



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE UN SISTEMA DEDICADO AL MONITOREO Y
AUTOMATIZACIÓN DE PARÁMETROS DE PROCESO EN UNA LÍNEA DE
PRODUCCIÓN DE CARTONES MOLDEADOS**

Marco Antonio Monzón Herrera

Asesorado por el Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo

Guatemala, mayo de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN SISTEMA DEDICADO AL MONITOREO Y
AUTOMATIZACIÓN DE PARÁMETROS DE PROCESO EN UNA LÍNEA DE
PRODUCCIÓN DE CARTONES MOLDEADOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MARCO ANTONIO MONZÓN HERRERA

ASESORADO POR EL ING. ARMANDO ALONSO RIVERA CARRILLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, MAYO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carillo
EXAMINADORA	Inga. Ingrid Salomé Rodríguez de Loukota
EXAMINADOR	Ing. José Antonio de León Escobar
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DE UN SISTEMA DEDICADO AL MONITOREO Y AUTOMATIZACIÓN DE PARÁMETROS DE PROCESO EN UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE CARTONES MOLDEADOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 28 de abril de 2018.



Marco Antonio Monzón Herrera

Guatemala, 26 de febrero de 2019

Ingeniero
Julio Cesar Solares Peñate
Coordinador del Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

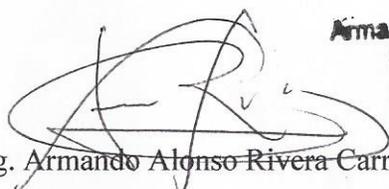
Apreciable ingeniero Solares.

Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titulado **“Diseño de un sistema dedicado al monitoreo y automatización de parámetros de proceso en una línea de producción de cartones moldeados”**, del señor **Marco Antonio Monzón Herrera**, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

Por tanto, el autor de este trabajo de graduación y, yo, como su asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

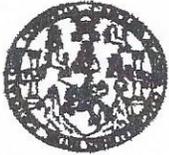
Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente



Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Colegiado No. 4265
Asesor

Armando Alonso Rivera Carrillo
Ingeniero Electrónico
Colegiado No. 4265



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 23. 2019.

7 de marzo 2019.

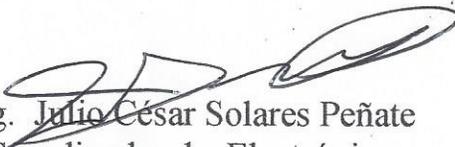
Señor Director
Ing. Otto Fernando Andrino González
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UN SISTEMA DEDICADO AL MONITOREO Y AUTOMATIZACIÓN DE PARÁMETROS DE PROCESO EN UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE CARTONES MOLDEADOS**, del estudiante; Marco Antonio Monzón Herrera, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica

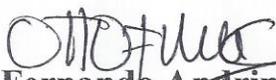


Julio César Solares Peñate
Ingeniero Mecánico Electricista
Colegiado No. 2330



REF. EIME 12. 2019.

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 del estudiante: MARCO ANTONIO MONZÓN HERRERA titulado: DISEÑO DE UN SISTEMA DEDICADO AL MONITOREO Y AUTOMATIZACIÓN DE PARÁMETROS DE PROCESO EN UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE CARTONES MOLDEADOS, procede a la autorización del mismo.


Ing. Otto Fernando Andriano González



GUATEMALA, 25 DE MARZO 2019.

Universidad de San Carlos
de Guatemala

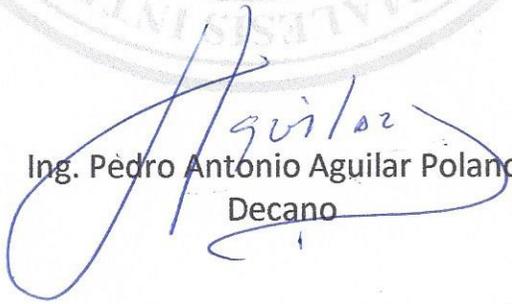


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 274.2019

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 DE UN SISTEMA DEDICADO AL MONITOREO Y AUTOMATIZACIÓN DE PARÁMETROS DE PROCESO EN UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE CARTONES MOLDEADOS**, presentado por el estudiante universitario: **Marco Antonio Monzón Herrera**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

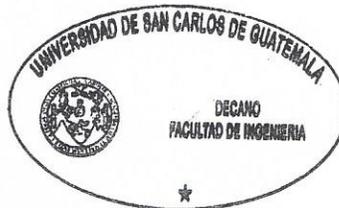
IMPRÍMASE:



Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, mayo de 2019

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por acompañarme guiarme y protegerme durante todo el trayecto.
Mi padre	Marco Antonio Monzón Linares todo su apoyo durante mi carrera, brindarme siempre lo mejor y ser mi ejemplo por seguir.
Mi madre	Aura Hilda Herrera Chavarría, por todo su amor y cuidados a lo largo de mi vida.
Mi novia	Maria del Mar García, por su incondicionalidad y apoyo en los momentos difíciles.
Mis hermanas	Darlin y Ashly Monzón, por su apoyo, cariño y por creer en mí.
Mis abuelos y tíos	Maria Estela Linares, Marco Tulio Monzón, Maria Joaquina Chavarría, Efraín Herrera, Lorena Monzón y Evelyn Herrera, por sus cuidados y apoyo a lo largo de mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de crecer académicamente.
Facultad de Ingeniería	Por todos los conocimientos adquiridos a lo largo de mi carrera.
Mis amigos de la facultad	Por cada momento compartido que quedará para el recuerdo.
Ing. Armando Rivera	Por su apoyo en la realización de este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. INSTRUMENTACIÓN EN LOS SISTEMAS DE MONITOREO.....	1
1.1. Instrumentos de medición.....	1
1.1.1. Elementos de un instrumento de medición	1
1.1.2. Características de los instrumentos de medición.....	2
1.1.2.1. Características estáticas	2
1.1.2.2. Características dinámicas	3
1.2. Variables por medir.....	4
1.2.1. Presión.....	4
1.2.1.1. Instrumentos de medición de presión	8
1.2.2. Caudal.....	15
1.2.2.1. Instrumentos de medición de caudal ...	18
1.2.3. Nivel	25
1.2.3.1. Instrumentos de medición directa de nivel	25
1.2.3.2. Instrumentos de medición indirecta de nivel	28
1.2.4. Temperatura	32

	1.2.4.1.	Instrumentos de medición de temperatura	32
	1.2.5.	Peso.....	37
	1.2.6.	Proximidad.....	38
	1.2.7.	Densidad.....	41
	1.2.8.	Humedad	41
	1.2.9.	Consistencia	42
	1.2.10.	Temporizadores.....	43
2.		RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN EN PROCESO DE ELABORACIÓN DE CARTÓN.....	47
	2.1.	Listado de señales de campo	47
	2.2.	Descripción del proceso	50
	2.2.1.	Pesaje en banda transportadora	52
	2.2.2.	Mezclado y refinado.....	56
	2.2.3.	Proceso de moldeado.....	61
	2.2.4.	Proceso de secado	65
	2.2.5.	Almacenaje	67
	2.2.6.	Variables de campo adicionales.....	68
	2.2.7.	Variables eléctricas.....	69
3.		ELABORACIÓN DEL DISEÑO	71
	3.1.	Selección de equipos a utilizar	72
	3.1.1.	Controlador lógico programable	72
	3.1.1.1.	Conceptos fundamentales del PLC.....	72
	3.1.1.2.	Selección de PLC y módulos adecuados.....	73
	3.1.2.	Transductores y actuadores	76

	3.1.2.1.	Proceso de selección dispositivos transductores.....	76
	3.1.2.2.	Proceso de selección de actuadores ...	84
	3.1.3.	Interfaz Humano Máquina	86
	3.1.3.1.	Conceptos fundamentales de HMI.....	87
	3.1.3.2.	Tipos de HMI	89
	3.1.3.3.	Selección de HMI adecuadas.....	90
	3.1.3.4.	Configuración de HMI.....	92
3.2.		Diseño del sistema de monitoreo	96
	3.2.1.	Protocolos de comunicación para redes industriales.....	96
	3.2.2.	Comunicación entre equipos de la red.....	98
	3.2.3.	Diagramas de topología de red	101
	3.2.4.	Configuración del sistema de monitoreo en la línea de producción	102
4.		PROTECCIÓN DE EQUIPO ELECTRÓNICO DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN.....	109
	4.1.	Fenómenos que afectan la calidad de energía eléctrica.....	109
	4.1.1.	Corto circuito y sobre corriente.....	109
	4.1.2.	Fluctuaciones en la tensión	111
	4.1.3.	Transitorios	112
	4.1.4.	Armónicos	112
	4.1.5.	Desbalances y variación de frecuencia.....	115
	4.1.6.	Factor de potencia	115
	4.2.	Dispositivos de protección	116
	4.2.1.	Descripción de los dispositivos de protección.....	127
	4.2.1.1.	Interruptores termomagnéticos	127
	4.2.1.2.	Supresor de transitorios:	133

4.2.1.3.	Supresor de transitorios ethernet.....	135
4.2.1.4.	Transformadores de aislamiento.....	136
4.2.1.5.	Fuente de alimentación ininterrumpida.....	137
4.2.1.6.	Filtros para armónicos:.....	138
4.2.2.	Equipos de medición de calidad de energía	140
4.2.3.	Selección de equipos adecuados según sus características.....	140
4.2.4.	Diagramas completos de protecciones	145
CONCLUSIONES.....		149
RECOMENDACIONES		151
BIBLIOGRAFÍA.....		153

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagramas para distintos tipos de sensores de presión.....	7
2.	Manómetro líquido en forma de “U”	9
3.	Tubo de Bourdon	10
4.	Sensor resistivo	11
5.	Sensor capacitivo.....	12
6.	Funcionamiento de un sensor piezoeléctrico	13
7.	Funcionamiento de un sensor de presión inductivo	15
8.	Patrón de flujo dentro de una tubería	17
9.	Caudalímetro de turbina	21
10.	Caudalímetro electromagnético.....	22
11.	Funcionamiento de un rotámetro.....	24
12.	Sensor de flote.....	27
13.	Medición ultrasónica de nivel.....	28
14.	Medición indirecta de líquido por método de presión.....	29
15.	Sensor capacitivo para líquidos conductivos y no conductivos	30
16.	Sondas de alto, común y bajo nivel.....	31
17.	Conexión de la sonda de resistencia al puente de Wheatstone	34
18.	Curva característica de los tipos de termopares	37
19.	Partes de un sensor inductivo	39
20.	Sensor fotoeléctrico reflectivo.....	40
21.	Sensor fotoeléctrico de barrera	40
22.	Sensor retro reflectivo.....	41
23.	Medida de humedad por infrarrojo	42

24.	Medidor de consistencia tipo paleta	43
25.	Retardo a la conexión.....	44
26.	Retardo a la desconexión	45
27.	Temporizador intermitente.....	45
28.	Nomenclatura para identificar un instrumento.....	49
29.	Etapas del proceso de producción de cartones moldeados	51
30.	Producción de cartones moldeados	51
31.	Moldeadora de cartón.....	63
32.	Controlador M221M32TK	74
33.	Configuración de módulos de entradas/salidas	75
34.	Sensor ultrasónico de nivel para área 101	77
35.	RTD Reotemp AH-R-2T3-PX11224X.....	77
36.	Medidor de caudal Siemens 7ME6110-2YA10-1AA2	78
37.	Transmisor de consistencia rotacional KC/5-705.....	79
38.	Transmisor de presión diferencial SITRANS P310	80
39.	Sensor de varilla Pointek CLS200.....	80
40.	Transmisor de consistencia óptico	81
41.	Sensor inductivo NRN75-FP-E2-C-P3-V.....	83
42.	Sensor fotoeléctrico OBS4000	83
43.	Diagrama de conexión de balizas XVUC	84
44.	Vista frontal Interfaz Humano Máquina	87
45.	Vista inferior y posterior de HMI	88
46.	Ubicación física de HMI	91
47.	Visualización parámetros área 101	93
48.	Visualización parámetros área 102	93
49.	Visualización parámetros área 103.....	94
50.	Visualización parámetros área 104	94
51.	Visualización parámetros área 105.....	95
52.	Visualización parámetros área 106.....	95

53.	Diagrama de señales en área 101	98
54.	Diagrama de señales en área 102	99
55.	Diagrama de señales en área 103	100
56.	Diagrama de señales en área 104 Y 105	100
57.	Diagrama de señales área 106.....	101
58.	Diagrama de sistema de monitoreo.....	102
59.	Configuración de entradas y salidas	103
60.	Configuración entradas analógicas	104
61.	Programación control área 101	105
62.	Programación control área 102	106
63.	Programación área 103	107
64.	Programación área 104, 105 y 106	108
65.	Método de Wenner para la medición de resistividad de la tierra	119
66.	Reparto de corriente y potenciales.....	121
67.	Reparto de potencial entre dos puntos.....	122
68.	tensión de paso y de contacto	125
69.	Especificaciones del sistema de puesta a tierra	126
70.	Partes de la curva de disparo	128
71.	Curvas de disparo interruptores termomagnéticos	129
72.	Diagrama unifilar general planta de cartones moldeados.....	130
73.	Unifilar con corrientes de cortocircuito	131
74.	Curvas características de arranque de motor y protecciones	132
75.	Esquema de cableado de los supresores de transitorios	135
76.	Supresor de transitorios Ethernet.....	136
77.	Transformador de aislamiento	137
78.	Diagrama fuente de alimentación ininterrumpida VDC	137
79.	Filtro de armónicos pasivo.....	138
80.	Filtro de armónicos activo	139
81.	Aislador galvánico AV/AV	141

82.	Aislador galvánico AC/AC	141
83.	Supresor de transitorios VAL-MS 120 ST	142
84.	Visualización de tensión L-L.....	143
85.	Visualización de históricos tensión L-N.....	144
86.	Visualización de corriente en las líneas de alimentación.....	144
87.	Visualización de armónicos y diagramas de factor de potencia	145
88.	Configuración de alarmas e histórico	145
89.	Diagrama de protecciones de entradas y salidas	146
90.	Diagrama de protecciones red de comunicación	147
91.	Diagrama de supresión y medición	147

TABLAS

I.	Unidades de presión.....	6
II.	Características de sondas de resistencia.....	33
III.	Letras de identificación para instrumentos de campo	48
IV.	Asignación de áreas de proceso	52
V.	Porcentaje de tipo de cartón.....	52
VI.	Indicadores de alerta según estado de la señal de la banda.....	53
VII.	Indicadores de alerta según nivel de contenedor	54
VIII.	Indicadores de alerta según temperatura del contenedor.....	55
IX.	Listado de señales de campo del área de pesaje.....	56
X.	Indicadores de alerta en contenedor de Carbonato de Calcio.....	57
XI.	Indicadores de alerta de temperatura	59
XII.	Indicadores de alerta de consistencia	60
XIII.	Listado de señales en área de mezclado y refinado.....	61
XIV.	Indicadores de alerta de temperatura	62
XV.	Indicadores de alerta detección de metales.....	63
XVI.	Indicadores de alerta de presión	64

XVII.	Señales de campo del área de moldeado	65
XVIII.	Indicadores de alerta de temperatura en secado	66
XIX.	Señales de campo del área de secado	67
XX.	Señales de campo en Proceso de Almacenaje.....	68
XXI.	Señales de campo adicionales	69
XXII.	Variables eléctricas.....	70
XXIII.	Resumen de variables por proceso	71
XXIV.	Señales de campo balizas área 101	85
XXV.	Señales de campo balizas área 102	85
XXVI.	Señales de campo balizas área 103 y 104.....	86
XXVII.	Señales de campo balizas área 105 y 106.....	86
XXVIII.	Características HMIGTO5310	92
XXIX.	Listado de dispositivos de protección utilizados en el diagrama unifilar.....	133
XXX.	Elección de la protección en función del esquema	134

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
AWG	Calibre de alambre estadounidense
C	Capacitancia
NPT	Conexión de rosca cónica
I	Corriente
RTD	Detector de temperatura resistivo
THD	Distorsión armónica total
AI	Entrada analógica
DI	Entrada digital
°C	Grado centígrado
g	Gravedad
Kg	Kilogramo
Psi	Libra por pulgada cuadrada
μ	Micro (1×10^{-6})
m	Mili (1×10^{-3})
mA	Miliamperio
Ω	Ohmio
%	Porcentaje
R	Resistencia
AO	Salida analógica
DO	Salida digital
SPT	Sistema de puesta a tierra
T	Temperatura

t	Tiempo
VAC	Voltaje alterno
VDC	Voltaje directo

GLOSARIO

Capacitancia	Cantidad de energía eléctrica almacenada para una diferencia de potencial eléctrico dada.
Electromagnetismo	Rama de la física que estudia y unifica los fenómenos eléctricos y magnéticos en una sola teoría.
Exactitud	Capacidad de un instrumento de acercarse al valor de la magnitud real.
Fiabilidad	Medida de la probabilidad de que un instrumento continúe comportándose dentro de los límites especificados de error en un tiempo determinado.
HMI	Interfaz utilizada para mostrar y controlar ciertos procesos de una forma interactiva.
Infrarrojo	Fenómeno de radiación electromagnética de mayor longitud de onda que la luz visible, utilizada para el transporte de datos de manera inalámbrica.
Módulo	Estructura o bloque de piezas que, en una constitución se ubican en cantidad a fin de hacerla más sencilla, regular y económica.

Monitoreo	Supervisión y control de ciertos parámetros.
Onda	Propagación de una perturbación de alguna propiedad en el espacio (densidad, presión, campo eléctrico, etc.).
Precisión	Capacidad de un instrumento de dar el mismo resultado en distintas repeticiones de medición.
Potencia	Cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento eléctrico o electrónico.
Puerto	Interfaz física a través de la cual se pueden enviar y recibir distintos tipos de datos.
Resistencia eléctrica	Oposición de un material al ser atravesado por una corriente eléctrica.
Retardo	Tiempo que tarda una señal para atravesar un dispositivo.
Rotámetro	Instrumento utilizado para medir caudal por medio de la rotación de su mecanismo.
Sensor	Objeto capaz de variar una propiedad ante magnitudes físicas o químicas, llamadas variables y transformarlas con un transductor en variables eléctricas.

TAG	Etiqueta utilizada para asignar un nombre a cierta magnitud o característica.
Transductor	Dispositivo que capta energía de naturaleza física y la convierte en una señal de otro tipo (regularmente eléctrica).
Ultrasónico	Tipo de onda utilizada principalmente para medir distancia por medio del tiempo que tarda en reflejarse.

RESUMEN

El presente trabajo consiste en el diseño de un sistema de monitoreo y automatización de parámetros de proceso en una línea de producción de cartones moldeados y un sistema de protección del equipo eléctrico y electrónico considerado para llevarlo a cabo.

Se considerará e identificará las variables de proceso de la línea de producción, se analizará cada una de ellas con el fin de seleccionar los dispositivos medidores, actuadores adecuados y los distintos fenómenos que afectan a los dispositivos eléctricos y electrónicos para diseñar un sistema de protección que minimice los daños que estos puedan causar.

Se dimensionará el dispositivo de procesamiento adecuado acorde a la cantidad de entradas/salidas, y se considerará su conexión con los medidores y actuadores. Posteriormente, se programará para que lleve a cabo las acciones correctivas en base a las lecturas que realice.

OBJETIVOS

General

Diseñar un sistema dedicado al monitoreo de parámetros de proceso en una línea de producción de cartones moldeados, para la toma de decisiones por medio de automatización.

Específicos

- Explicar y determinar las tecnologías e instrumentos a utilizarse en el diseño del sistema.
- Conocer las variables del proceso y definir el rango de valores que debe tener cada parámetro medido.
- Dimensionar los instrumentos necesarios para la medición y visualización de cada parámetro de la línea de producción y diseñar un sistema donde interactúen entre sí.
- Proponer el diseño del sistema de protección eléctrico para los instrumentos y dispositivos utilizados en el proceso.

INTRODUCCIÓN

Actualmente en la industria guatemalteca, una gran cantidad de procesos industriales son monitoreados por operarios a quienes les han designado dicha labor, sin embargo, esto implica que la decisión de alertar a sus superiores para tomar acciones sobre alguna anomalía en el proceso queda a su criterio, lo que ocasiona, en muchos casos, que estas desviaciones posteriormente ocasionen un daño mucho mayor.

Monitorear y automatizar los parámetros de una línea de producción y realizar acciones cuando sus valores estén fuera de los rangos establecidos, permitirá tomar acciones rápidas y evitar errores que pueden resultar catastróficos.

Afortunadamente, la tecnología ha avanzado a tal punto que, la mayoría de los procesos pueden ser monitoreados por medio de dispositivos transductores que proporcionan señales interpretables por sistemas más complejos para tomar acciones, con lo que se puede evitar en gran medida el error humano, debido a que la interpretación de los rangos establecidos para cada proceso se realiza con base en los parámetros establecidos mediante el diseño del sistema de monitoreo, según la validación de cada proceso.

De esta manera, se propone diseñar un sistema para monitorear los siguientes parámetros de la línea de producción:

- Flujo y temperatura del agua.
- Medición de flujo de mezcla.

- Peso de la materia prima.
- Tiempo de mezclado.
- Consistencia de la mezcla.
- Presión en bombas de moldeo.
- Temperatura del horno.

Todos los parámetros anteriormente descritos se obtienen utilizando instrumentos instalados en distintas áreas del proceso, por lo que se tomará en cuenta, no solo las especificaciones en cuanto a capacidad de los instrumentos, sino también su forma de conexión al proceso.

Con la información anterior se diseñará un sistema que pueda tomar acciones para corregir posibles errores en el proceso de producción y a la vez, permitirá a los operarios y jefes de planta visualizar los valores puntuales de los parámetros de proceso en una HMI.

1. INSTRUMENTACIÓN EN LOS SISTEMAS DE MONITOREO

Antes de iniciar el diseño de cualquier sistema, se debe entender las bases del funcionamiento de los equipos que lo conformarán. Dicho lo anterior, se procederá a explicar las bases de la instrumentación industrial, ya que el uso de la instrumentación correcta provocará grandes beneficios en el proceso, aumentando la productividad y calidad. En contraparte, si la instrumentación seleccionada no es la adecuada, provocará lecturas incorrectas que pueden llegar a producir pérdidas y resultados de baja calidad.

1.1. Instrumentos de medición

Son los encargados de captar las señales físicas del medio (en este caso los parámetros de la línea de producción) y en base a ellas generar una respuesta entendible por el resto de los elementos que conforman el sistema de control.

1.1.1. Elementos de un instrumento de medición

Entre los elementos más importantes de un instrumento tenemos:

- **Sensor** Es el elemento que se encuentra en contacto directo con la señal a medir, también se le llama “elemento sensible primario” ya es el que responde a las variaciones de la magnitud. Las señales de los sensores se utilizan en el proceso para realizar un seguimiento continuo de los cambios en el área controlada.

- **Transductor:** Traduce un tipo de energía en otro más adecuado para el sistema. Por lo regular, transforma la señal que entrega el sensor en otra de tipo eléctrico, esto debido a la facilidad de transmitir señales eléctricas comparado con la transmisión de señales mecánicas o hidráulicas.
- **Captador:** Es el dispositivo que capta información de la salida y la compara con la señal de referencia. En sistemas de lazo abierto, captador y sensor suelen ser lo mismo.
- **Transmisor** El transmisor es una parte esencial de cualquier instrumento, ya que capta la señal a través del elemento primario y la transmite a distancia en forma de señal. Dependiendo de la aplicación en la que se va a utilizar, el transmisor a elegirse puede enviar distintos tipos de señales, entre las principales tenemos la electrónica, digital y neumática.

1.1.2. Características de los instrumentos de medición

Independiente de la magnitud física a medir, los instrumentos de medición cuentan con ciertas características que se deben tomar en cuenta para asegurar que tengan un óptimo funcionamiento. Se puede dividir las características en estáticas y dinámicas;

1.1.2.1. Características estáticas

Describen el comportamiento del sensor en régimen permanente o con cambios muy lentos de la variable a medir.

- **Rango de medida:** Es el conjunto de valores que puede tomar la señal con una tolerancia de error aceptable (máximo y mínimo valor medible).

- Alcance: Diferencia entre el valor superior e inferior del rango de medida del instrumento.
- Exactitud: Variación máxima entre la salida obtenida y la teórica dada como patrón para el sensor. Mientras más exacto sea el instrumento, más cercano será el valor obtenido al valor real.
- Precisión: Se refiere al grado de dispersión entre distintas lecturas obtenidas. Dicho de otra manera, indica la máxima variación entre valores obtenidos al medir varias veces la misma entrada con el mismo sensor e idénticas condiciones.
- Resolución: Es la capacidad del sensor para diferenciar entre valores muy próximos.
- Sensibilidad: Razón entre la variación de la señal de salida y la variación de la magnitud de entrada.
- Histéresis: Es la diferencia máxima que se observa en los valores de la señal de salida para el mismo valor cualquiera del campo de medida, luego que la variable haya recorrido toda la escala ascendente y descendentemente.

1.1.2.2. Características dinámicas

Describen el comportamiento en régimen transitorio, principalmente se refiere a la capacidad del instrumento de procesar la información en tiempo real.

- Velocidad de respuesta: Como su nombre lo indica, se refiere al tiempo que el instrumento tarda en entregar una salida respecto a cada valor de entrada. Cabe mencionar que, en el monitoreo de parámetros, es muy importante que el tiempo de retardo entre la lectura y la respuesta sea breve, ya que se necesita realizar el monitoreo prácticamente en tiempo real, sin embargo, en la actualidad la mayoría de los instrumentos cumple con dicha especificación.
- Respuesta en frecuencia: Indica la capacidad del sensor de detectar las variaciones de la señal de entrada a medida que aumenta la frecuencia, por lo regular los sensores se comportan como pasa bajos.
- Estabilidad: Indica la desviación en la salida del sensor respecto al valor teórico dado cuando se varían parámetros exteriores distintos al que se va a medir (condiciones ambientales, alimentación, entre otros).

1.2. Variables por medir

En una línea de producción, existen distintos tipos de variables que desean ser monitoreadas, siendo las principales las siguientes:

1.2.1. Presión

La presión se define como fuerza por unidad de superficie y puede expresarse en distintas medidas (pascal, bar, atmósfera, kilogramo por centímetro cuadrado y libra por pulgada cuadrada).

El sistema de unidades más utilizado en la actualidad para los instrumentos de medición de presión es la libra por pulgada cuadrada (mejor

conocida como psi), sin embargo, dependiendo de origen del fabricante del instrumento, la escala utilizada o de la aplicación, puede indicarse en distintos sistemas, los cuales se definirán a continuación:

- Pascal: Es la unidad más utilizada en el Sistema Internacional de Unidades. Equivale a la presión que una fuerza de 1 Newton desarrolla sobre un plano de un metro cuadrado.
- Psi: Es una de las medidas más utilizadas del sistema inglés, definida como la fuerza (Libras) por unidad de área (pulgadas cuadradas).
- Pulgada de columna de agua: Representa la presión ejercida por una columna de agua pura (densidad $1,000\text{kg/m}^3$) de una pulgada de altura.
- Pulgada de columna de mercurio: Representa la presión ejercida por una columna de mercurio de una pulgada de altura a 32°F en condiciones de gravedad estándar.
- Atmósfera: Se define como la presión ejercida por la atmósfera a nivel del mar.

A continuación, se presenta una tabla de conversión de las unidades de presión más utilizadas:

Tabla I. **Unidades de presión**

	Psi	Pulgada c. de agua	Pulgada c. de mercurio	Atmósfera	Kg/cm ²	Bar	Pascal
Psi	1	27.68	2.036	0.0680	0.0703	0.0689	6894.76
Pulgada c. de agua	0.0361	1	0.0735	0.0024	0.0025	0.0024	249
Pulgada c. de mercurio	0.4912	13.6	1	0.0334	0.0345	0.0338	3386.39
Atmósfera	14.7	406.9	29.92	1	1.033	1.0132	1.0133x10 ⁵
Kg/cm ²	14.22	393.7	28.96	0.9678	1	0.98	98066
Bar	14.5	401	29.53	0.987	1.02	1	10 ⁵
Pascal	0.00014	0.0040	0.00029	0.987x10 ⁻⁵	0.102x10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	1

Fuente: CREUS, A. *Instrumentación Industrial*. p. 26.

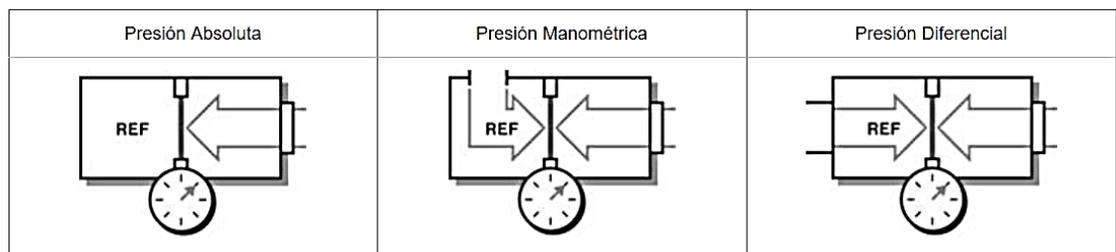
Existen distintas formas de medir la presión, dependiendo del punto de referencia del que se realice la medición. Dicho punto de referencia se deberá determinar dependiendo la aplicación:

- Presión atmosférica: Es la presión ejercida por la atmósfera terrestre, a nivel del mar, esta atmósfera es aproximadamente 1,01325 bar o 1,03322 Kg/cm².
- Presión manométrica: Es la presión medida tomando como punto de referencia la presión atmosférica. Este tipo de medida es idea para medir presión en neumáticos y la presión arterial.
- Presión absoluta: Se mide en relación con el cero absoluto, este tipo de medida es ideal para presiones atmosféricas usadas en altímetros o presiones al vacío.

$$P_{absoluta} = P_{Manométrica} + P_{Atmosférica}$$

- Presión diferencial: Es la diferencia entre dos presiones. Puede usarse este método para mantener una presión relativa entre dos contenedores como un tanque de compresor y línea de transmisión asociada.
- Vacío: Es la presión medida por debajo de la atmosférica, por lo regular se expresa en pulgadas de columna de agua. La variación en la presión atmosférica influye considerablemente en la lectura de vacío.

Figura 1. **Diagramas para distintos tipos de sensores de presión**



Fuente: *Diagramas de sensores de presión*. <http://www.ni.com/white-paper/13034/es>.

Consulta: 14 de septiembre de 2018.

Teniendo claras las bases anteriores, se procederá a explicar los instrumentos de medición de presión más utilizados en la actualidad, los cuales pueden clasificarse en dos tipos:

- Elementos primarios que miden la presión comparándola con la ejercida por un líquido de densidad y altura conocida:
 - Barómetro de cubeta.
 - Manómetro de columna de líquido.
 - Manómetro de tubo inclinado.
 - Manómetro de campana.

- Elementos primarios elásticos que se deforman por la presión interna del fluido que contienen:
 - Tubo Bourdon.
 - Elemento en espiral.
 - Elemento Helicoidal.
 - Diafragma Fuelle.
 - Piezoeléctricos.

1.2.1.1. Instrumentos de medición de presión

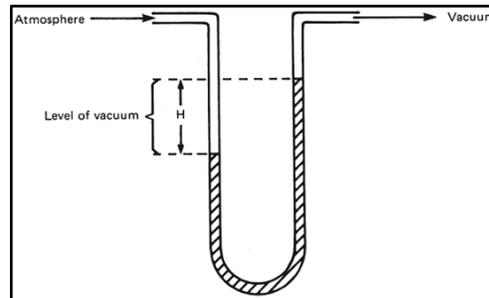
- Manómetro de columna de líquido: está compuesto por un tubo en forma de “U”; debido a la diferencia de presión entre sus lados desplaza el líquido contenido hacia su parte con menor presión.

La cantidad de líquido desplazada es proporcional al número de veces que es mayor una presión respecto a otra:

$$H = \frac{P - P_{ref}}{\rho g}$$

Donde: ρ es la densidad del líquido y g es la aceleración de la gravedad. En este caso, un sensor de nivel (como un flotador) puede permitir entonces obtener una señal eléctrica.

Figura 2. **Manómetro líquido en forma de “U”**



Fuente: *Manómetro líquido en U*. <http://www.fao.org/docrep/004/T0218E/T0218E14.gif>.

Consulta: 14 de septiembre de 2018.

Como aclaración final cabe resaltar que el líquido debe ser compatible con el fluido cuya presión se desea medir, y el tubo debe soportar los esfuerzos mecánicos a los que queda sometido.

- Tubo de Bourdon: Consiste en un tubo metálico curvado en forma de arco, que tiende a enderezarse dependiendo de la presión que se le aplique, este movimiento se transmite por medio de un mecanismo amplificador.

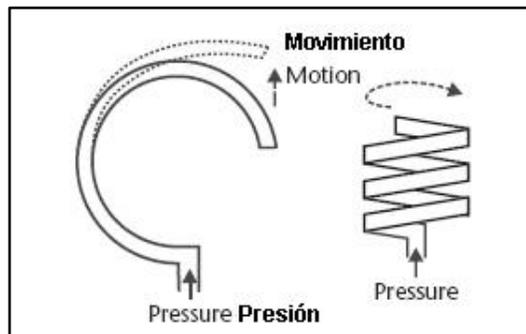
Uno de los aspectos a considerar es que, si se somete a una presión superior a la de su límite, puede producirse una deformación permanente que hace necesario que se deba volver a calibrar. Para la obtención de una señal eléctrica se acude a diversos sensores de desplazamiento.

Entre las características del tubo de Bourdon se tiene:

- Puede utilizarse a presiones de hasta 200atm, con una exactitud de 2 % - 3 %.

- Bajo costo de adquisición y mantenimiento.
- Pueden solicitarse rellenos con glicerina para evitar vibraciones en la aguja y lograr con esto una indicación confiable.
- Puede utilizarse en líquidos, aceites y gases.
- Facilidad de instalación.
- Falla por fatiga, sobrepresión, corrosión o explosión.
- La temperatura del ambiente puede afectar su funcionamiento.
- Puede ser afectado por vibraciones extremas.

Figura 3. **Tubo de Bourdon**



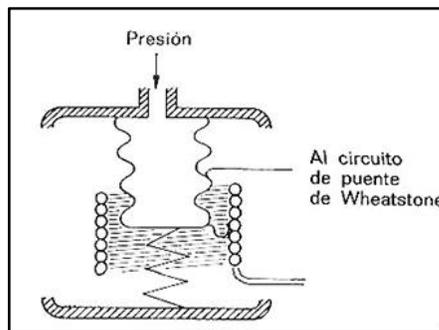
Fuente: *Tubo de Bourdon*. <http://www.sapiensman.com/tecnoficio/electricidad/images/bourdon.jpg>. Consulta: 15 de septiembre de 2018.

- Sensores resistivos: Su principio básico consiste en un mecanismo que produce una variación de movimiento (en la mayoría de los casos un tubo de Bourdon), y se combina con una variación de resistencia por potenciómetro.

El potenciómetro puede ser una barra continua o un enrollamiento en bobina. Generalmente esta resistencia forma parte de un puente de Wheastone. Entre las características de los sensores resistivos se tiene:

- Simplicidad.
- Manejo de potencias de señal suficientes para no utilizar amplificadores
- Rango de 0-300Kg/cm².
- Baja resolución.
- Sensibles a vibraciones y condiciones ambientales.

Figura 4. **Sensor resistivo**



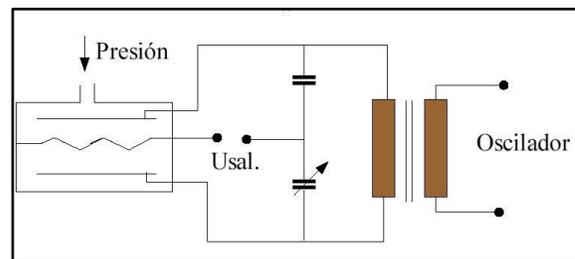
Fuente: *Sensor resistivo*. www.dirind.com/dae/imagenes/clasificaciones/monografias/presion/presion_6.jpg. Consulta: 15 de septiembre de 2018.

- **Sensores capacitivos:** Este tipo de sensor consiste en un mecanismo sencillo y de funcionamiento estable. Posee dos superficies de metal estrechamente espaciadas de forma paralela (formando un capacitor), una de las cuales es un diafragma capaz de flexionarse ligeramente bajo presión aplicada. Cualquier cambio en la presión aplicada alterará la distancia entre las placas, creando el efecto de un capacitor variable. El cambio resultante en la capacitancia es detectado por un circuito comparador lineal muy sensible y éste a su vez, produce una señal de salida. Entre las características de un sensor capacitivo se tiene:

- Sencillez y alta fiabilidad.
- Exactitud de hasta $\pm 0.2\%$.
- Alta sensibilidad.
- Amplitud de rangos de presión.
- Alta durabilidad.

Su señal de salida es débil, por lo que precisa de amplificadores, lo cual produce el riesgo de introducir ruido.

Figura 5. **Sensor capacitivo**



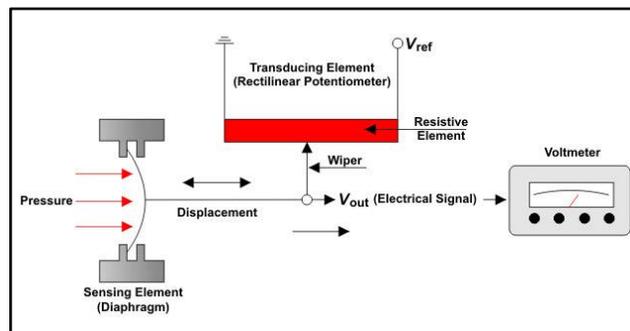
Fuente: *Sensor capacitivo*. <http://cmapspublic.ihmc.us/rid=1M6L8GMRQ-1GPQ9B8-2886/Sensor%20capacitivo.jpg>. Consulta: 15 de septiembre de 2018.

- **Sensores piezoeléctricos:** Los sensores piezoeléctricos se caracterizan por tener un elemento transductor hecho de un material piezoeléctrico.

Se le llama sensor activo porque en principio no se necesita energía externa para obtener una señal de salida. Usualmente el elemento de transducción y el sensor son uno solo. En un sensor bien diseñado, la presión del fluido en el área efectiva del diafragma es constante, por lo que la fuerza transmitida al elemento de transducción es directamente proporcional a la

presión que actúa sobre él, esto ocasiona una deformación en el material, con lo que genera señales eléctricas proporcionales.

Figura 6. **Funcionamiento de un sensor piezoeléctrico**



Fuente: *Funcionamiento de un sensor piezoeléctrico.*

[www.azosensors.com/images/Article_Images/ImageForArticle_36\(1\).jpg?wmode=opaque](http://www.azosensors.com/images/Article_Images/ImageForArticle_36(1).jpg?wmode=opaque).

Consulta: 15 de septiembre de 2018.

Entre las ventajas de utilizar un sensor piezoeléctrico se tiene:

- Alta sensibilidad
- Bajo costo
- Alta rigidez mecánica a deformaciones
- Tamaño reducido

Entre las desventajas de utilizar un sensor piezoeléctrico están:

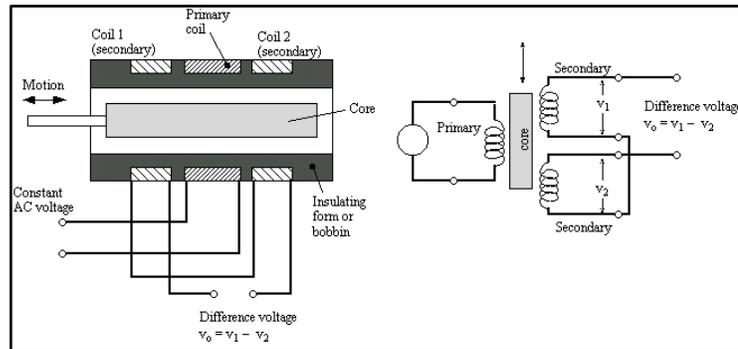
- No poseen respuesta en corriente continua: Debido a que la resistencia de los materiales piezoeléctricos es grande, más no infinita, al aplicar un esfuerzo constante se generará inicialmente una carga que será drenada al cabo de cierto tiempo.

- El sensor debe trabajar a frecuencias muy por debajo de la frecuencia de resonancia del material, debido a que, al aplicar un esfuerzo mecánico variable, la única fuente de amortiguamiento es el propio rozamiento interno.
- Son sensibles a altas temperaturas (turmalina hasta 700°C y cuarzo 260°C), además que por encima de la temperatura de Curie dejan de ser piezoeléctricos.
- Sensores inductivos: Su principio se basa en un Transformador Diferencial Variable Lineal (LVDT por sus siglas en ingles), en el cual el núcleo está vinculado a un diafragma. El LVDT es un dispositivo que provee un voltaje de salida proporcional al desplazamiento de su núcleo. Cuando el núcleo se desplaza por la presión, el número de espiras expuestas en el bobinado secundario cambia en forma lineal, por lo tanto, la amplitud de la señal inducida cambiará también linealmente con el desplazamiento.

Entre sus principales características se tiene:

- Error usual de 1 %.
- Pequeño y robusto.
- Buena resolución.
- Larga duración debido a que no hay desgaste mecánico.
- Alta velocidad de conmutación.

Figura 7. **Funcionamiento de un sensor de presión inductivo**



Fuente: *Funcionamiento de un sensor de presión inductivo*.

http://1.bp.blogspot.com/_SEJ_mMmfxvU/Su6_5IYa9I/AAAAAAAAACs/6Ge0WleDLBs/s1600/Lvdt1.gif. Consulta: 15 de septiembre de 2018.

1.2.2. Caudal

La medición de caudal es una de las más utilizadas en la industria moderna tanto en líquidos como en gases; también son conocidos como medidores de flujo.

El flujo se define como la cantidad de líquido o gas que pasa por unidad de tiempo en un área definida, en el caso de la industria principalmente tuberías.

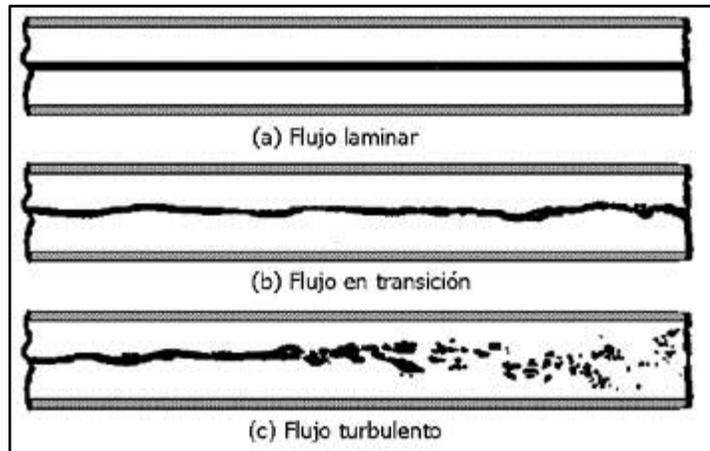
Caudal es una indicación de la cantidad de fluido en peso o volumen que se mueve en un determinado punto dentro de un periodo específico de tiempo. Las unidades utilizadas en la medición de caudal son: litros/min, m^3/h , $m^3/día$, m^3/mes , entre otros.

Como se indicó anteriormente, el flujo puede medirse ya sea en volumen o en peso; Por lo general los medidores de volumen se utilizan para medida general de caudal, mientras que los medidores de masa para aplicaciones en las que se requiere una mayor exactitud.

Existen factores que afectan el flujo de un fluido a través de una tubería, los cuales son:

- Velocidad: Se define como velocidad y dirección en que las partículas del fluido se mueven dentro de una tubería.
- Patrón de flujo: Se refiere a la forma en que se mueve el fluido a través de la tubería, depende en alto grado de su velocidad. El patrón puede ser laminar o turbulento. El flujo laminar se caracteriza porque las moléculas del fluido siguen trayectorias paralelas a través de la tubería. El flujo turbulento se caracteriza por patrones erráticos debido a que la turbulencia crea remolinos que revuelven las moléculas del fluido a lo largo de trayectorias irregulares. El patrón de flujo es muy importante al momento de realizar la medición, por lo que se recomienda instalar el instrumento en un segmento de la tubería recto y alejado de curvas para evitar la turbidez.

Figura 8. **Patrón de flujo dentro de una tubería**



Fuente: *Patrón de flujo dentro de una tubería.*

<http://www.sapiensman.com/tecnoficio/docs/images/tipos%20de%20flujos.jpg>. Consulta: 15 de septiembre de 2018.

- Fricción del fluido con contacto con la tubería: Es un aspecto muy importante para considerar, ya que la fricción causada reduce la velocidad del fluido en el área cercana a la pared, mientras más lisa es la tubería, menor es el efecto de fricción sobre la velocidad de fluido.
- Viscosidad: Es una medida cuantitativa de la tendencia del fluido a resistir la deformación. Los fluidos que fluyen libremente tienen viscosidad baja, mientras que los que parecen resistirse a fluir libremente tienen viscosidades altas. La viscosidad de un líquido depende principalmente de su temperatura y en menor grado de su presión; la viscosidad de los líquidos disminuye al aumentar la temperatura y la viscosidad de los gases normalmente aumenta al aumentar la temperatura. La presión tiene poco efecto sobre la viscosidad de líquidos, en los gases solamente es significativo a altas presiones.

- Densidad: Se define como el peso por unidad de volumen, la densidad cambia considerablemente con la temperatura, mientras que son prácticamente despreciables los cambios por variaciones de presión. En los gases y vapores la densidad es afectada tanto por temperatura como por presión.
- Temperatura y presión: Como ya se describió anteriormente, los efectos de la presión y temperatura afectan al resto de parámetros, por lo que deben tomarse muy en cuenta en el proceso. De igual manera al momento de seleccionar un instrumento de medición, es importante considerar que los materiales de los que esté construido el sensor soporten tanto la temperatura y presión nominal y máxima del proceso.

1.2.2.1. Instrumentos de medición de caudal

- Caudalímetro másico: Su funcionamiento utiliza como base el principio de Coriolis. Es ideal para procesos delicados de batcheo por peso, también para medir líquidos o gases que se necesiten medir de acuerdo con la masa, ya que su exactitud es independiente de la viscosidad, temperatura y densidad.

Entre las principales características del caudalímetro másico se tiene:

- Su salida es lineal con el flujo másico.
- No requiere compensación por variantes de presión o temperatura.
- Adecuado para casos de viscosidad variable.
- Permite la medición de líquidos difíciles de medir (adhesivo, nitrógeno líquido, etc.).

- Muy voluminoso.
 - No es apto para caudales elevados.
- Caudalímetro por desplazamiento positivo: Estos operan atrapando un volumen unitario y conocida y lo desplazan desde la entrega a la salida, mientras van contando el número de volúmenes desplazados en un determinado tiempo. Entre las principales características del caudalímetro por desplazamiento positivo se tiene:
 - Alta exactitud.
 - Amplio rango de medias.
 - Apto para fluidos con alta viscosidad.
 - Lectura local directa.
 - Si se va a medir en fluidos sucios, se necesita un filtro previo.
 - Alta pérdida de carga.
 - Costo elevado.
- Caudalímetro de turbina: Consisten en un rotor que gira a una velocidad directamente proporcional al caudal del paso del fluido. El fluido choca con el borde frontal de las palas del rotor produciendo una baja tensión, y como resultado de esta presión diferencial las palas giran. Debido al principio de Bernoulli, cuando la velocidad del fluido baja inmediatamente luego de las palas de la turbina se aumenta la presión aguas debajo de la turbina, y como consecuencia se ejerce una fuerza igual y opuesta a la del fluido aguas arriba, esto provoca que el rotor esté equilibrado hidrodinámicamente y gira entre los conos anterior y posterior sin utilizar rodamientos, con lo que se evita los efectos indeseables de un rozamiento.

En la actualidad, para captar la velocidad de la turbina, se utiliza dos tipos de convertidores, el de reluctancia y el inductivo.

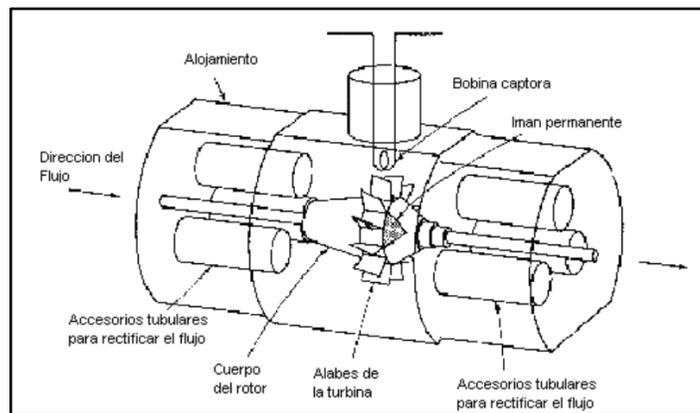
- En el medidor de reluctancia, la velocidad se determina por el paso de las palas individuales de la turbina a través de un campo magnético creado por un imán permanente montado en una bobina captadora exterior. El paso de cada pala varía la reluctancia del circuito magnético. Esta variación cambia el flujo de magnético, induciendo una corriente alterna proporcional al giro de la turbina en la bobina captadora.
- El medidor tipo inductivo actualmente es poco utilizado, el rotor lleva incorporadas piezas magnéticas y el campo magnético giratorio que se origina induce una corriente alterna en una bobina captadora exterior.

En los dos casos anteriores, la frecuencia que genera el rotor de turbina es proporcional al caudal; entre las principales características de los medidores de turbina se tiene:

- Exactitud elevada en el orden de $\pm 0,3$ %.
- Es el instrumento más preciso disponible para medir caudal.
- Presenta linealidad sobre un muy amplio rango de caudales.
- Rápida respuesta y excelente repetibilidad.
- Alto costo de adquisición y mantenimiento.
- El medidor debe instalarse de tal forma que siempre esté lleno de líquido, aunque el caudal sea nulo, ya que en la puesta en marcha el choque con el fluido a alta velocidad podría dañarlo.
- Debe utilizarse un filtro a la entrada del instrumento ya que el paso de partículas pueden desgastarlo fácilmente y afectar su precisión.
- Propenso a desgaste mecánico.

- Montaje intrusivo.
- No puede utilizarse en fluidos de alta viscosidad.

Figura 9. **Caudalímetro de turbina**



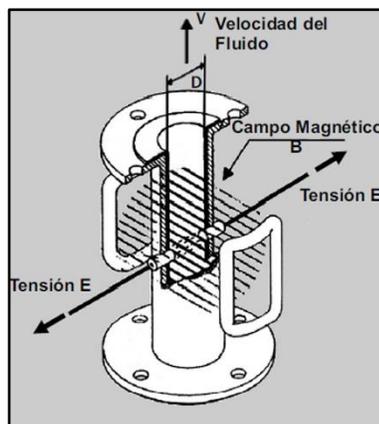
Fuente: *Caudalímetro de turbina*. http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/Caudal/Principios/Caudal_Sensores.pdf. Consulta: 15 de octubre de 2018.

- **Caudalímetro electromagnético:** El funcionamiento del caudalímetro electromagnético se basa en la ley de Faraday; al pasar un fluido conductor por un campo electromagnético se produce una fuerza electromotriz directamente proporcional a la velocidad del fluido.

En su interior están formados por un tubo revestido con un material aislante con una bobina en cada extremo. Al momento que circula corriente a través de las bobinas se produce un campo magnético en la sección transversal del tubo, el cual a su vez es aprovechado para medir la diferencia de potencial (en mV) utilizando dos electrodos. Posteriormente la diferencia de potencial es amplificada; entre las principales características de los medidores de caudal electromagnéticos se tiene:

- No genera pérdidas de carga.
- No intrusivo.
- No depende de la viscosidad debido a que el parámetro medido a través de la tubería es velocidad promedio.
- Permite la medición de caudales bidireccionales.
- No tiene partes móviles.
- Bajo costo de mantenimiento.
- Precisión media/alta.
- Costo alto.
- El líquido debe poseer una adecuada conductividad.
- No puede utilizarse en gases debido a la baja conductividad.

Figura 10. **Caudalímetro electromagnético**



Fuente: *Caudalímetro electromagnético*. <http://www.aguamarket.com/productos/productos.asp?producto=15244>. Consulta: 16 de octubre de 2018.

- Caudalímetro ultrasónico: Este tipo de sensor es utilizado principalmente en líquidos que contengan partículas, no puede ser utilizado en agua potable. Su funcionamiento se basa en el efecto Doppler, ya que una onda de sonido cambia de frecuencia cuando se refleja en una

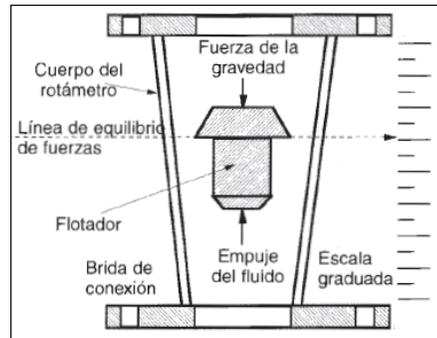
discontinuidad en movimiento de un líquido. El cambio de frecuencia en una onda ligeramente diferente es directamente proporcional al caudal del líquido; entre las principales características del caudalímetro ultrasónico se tiene:

- No ocasiona pérdida de carga.
 - No es intrusivo.
 - No tiene partes móviles.
 - El diámetro de la tubería no influye en el rendimiento o en el costo (son la opción más utilizada en aplicaciones con tubería de gran diámetro).
 - Ideal para medición de materiales tóxicos o peligrosos.
 - Poseen salida lineal.
 - Amplio rango de medición.
 - Instalación simple y económica.
 - Baja precisión.
- Rotámetro: Son conocidos como elementos de área variable, se caracterizan por el cambio de área que se produce entre el movimiento primario en movimiento y el cuerpo del medidor.

La posición del flotador dentro del rotámetro cambia proporcionalmente respecto al flujo del fluido. El caudal depende del peso específico del líquido, su viscosidad y de los valores de la sección interior del tubo, ya que ésta cambia según sea el punto de equilibrio del flotador.

En la figura se muestra un rotámetro de forma simplificada, que consta de un tubo vertical cónico, con un flotador en su interior. El fluido entra por la parte inferior del tubo y arrastra el flotador en dirección ascendente.

Figura 11. **Funcionamiento de un rotámetro**



Fuente: *Funcionamiento de un rotámetro*. http://instrumentacionycontrol.net/wp-content/uploads/2017/10/caudal_a_variable.gif. Consulta: 17 de octubre de 2018.

Entre las principales características de los medidores de caudal de disco oscilante se tiene:

- Económico para caudales bajos.
- Utilizado mayormente en tuberías con diámetro menor a 2".
- Amplio rango de medición.
- Puede ser utilizado en líquidos, vapores y gases.
- Instalación y mantenimiento simple.
- Por lo regular no se obtiene una señal eléctrica a partir de su indicación.
- Su costo incrementa en tubería de diámetro mayor a 2".
- Debe instalarse en sentido vertical y con caudal ascendente.
- Baja precisión.
- Debe utilizarse únicamente con caudales limpios.
- Caída de presión pequeña y constante.

1.2.3. Nivel

En la medición de nivel, existen diversos factores que deben considerarse al momento de elegir un tipo de sensor, como la presión del líquido, temperatura, turbulencia, volatilidad, corrosividad, nivel de precisión requerido, medición continua o en un solo punto.

Existen cuatro principales formas de medición de nivel: en un punto determinado, de forma continua, directa o indirectamente: la medición directa monitorea el nivel de forma ininterrumpida, la medición indirecta utiliza otras propiedades como la presión de un líquido para determinar su nivel.

La medición en un punto determinado se utiliza cuando únicamente se desea conocer la ausencia o presencia de líquido en un nivel específico. Existen tipos de medición de nivel dependiendo de las variables que se utilicen para determinar su valor: directa o indirecta:

1.2.3.1. Instrumentos de medición directa de nivel

- **Sensor de flote:** El sensor de flote es una alternativa muy utilizada dentro de la industria para procesos no críticos cuyo mecanismo puede medir valores dentro de un rango establecido (no debe confundirse con el interruptor de flote, el cual únicamente consta del estado abierto y cerrado). El valor de la medición dependerá únicamente de la posición del flote, que a su vez es desplazado hacia arriba o hacia abajo por el líquido a medir.

Entre sus principales ventajas se tiene su simplicidad, bajo costo, ser prácticamente independiente de la densidad del líquido, preciso y robusto.

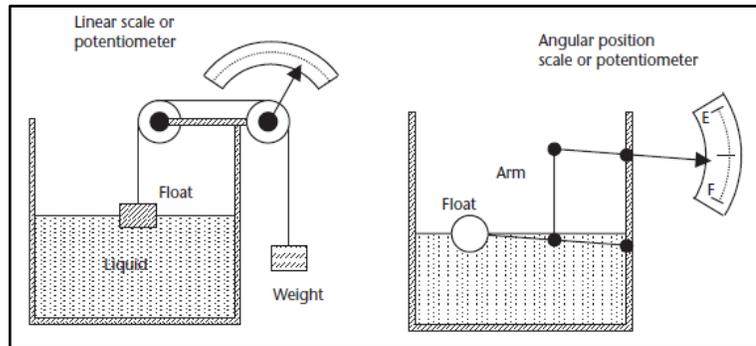
Entre sus desventajas radica que es necesario que el flote entre en contacto con el líquido, por lo que no puede utilizarse en procesos donde no debe haber ningún tipo de contaminación. Su precisión puede ser afectada por el desgaste las piezas que componen su mecanismo, así como por la turbidez del agua.

La medición con un sensor de flote puede mostrarse de manera lineal o angular.

- El medidor lineal posee el mecanismo más básico, ya que consta únicamente del flote, dos poleas y el potenciómetro. Puede observarse en la figura 1.13(a).
- La medición angular utiliza brazos y poleas adicionales posicionados como se muestra en la figura 1.13(b). Este método es no lineal pero también es muy utilizado para algunas aplicaciones.

El mecanismo puede ser conectado a un potenciómetro con el objetivo de obtener una señal eléctrica.

Figura 12. **Sensor de flote**



Fuente: DUNN, W. *Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control*. p. 56.

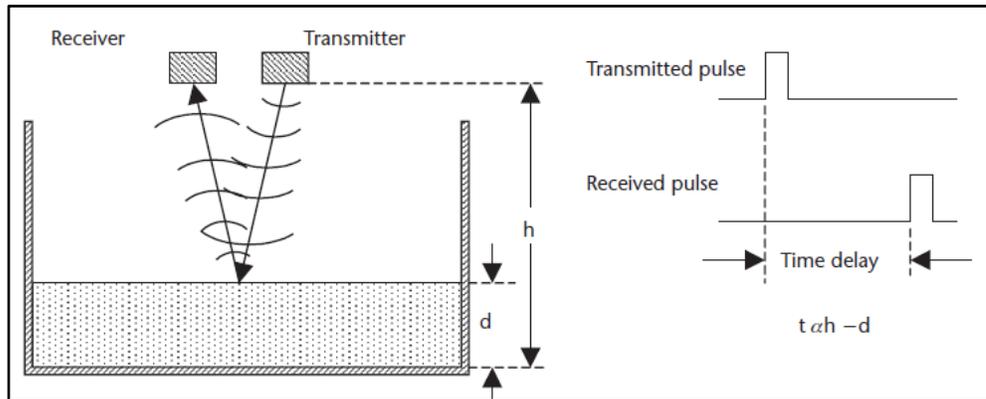
- **Sensor ultrasónico:** Es una alternativa que no necesita entrar en contacto con el líquido o sólido para realizar la medición, por lo que puede ser utilizado en líquidos corrosivos y volátiles.

Su funcionamiento consiste en transmitir un pulso ultrasónico (mayor a 20kHz), el cual se refleja en la superficie del líquido hacia el receptor. Dentro del controlador se mide el tiempo de dicho recorrido en base al resultado se calcula la distancia, dato que posteriormente puede representarse mediante una señal electrónica.

Entre sus ventajas se tiene que son confiables, precisos, rentables y el hecho de no necesitar contacto con el líquido o sólido a medir.

Debe tomarse en cuenta su temperatura de operación y la limpieza del aire, ya que esto puede atenuar las señales enviadas o influir en su velocidad, produciendo errores en la medición.

Figura 13. **Medición ultrasónica de nivel**



Fuente: DUNN, W. *Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control*. p. 56.

1.2.3.2. Instrumentos de medición indirecta de nivel

La medición indirecta es un método utilizado para realizar mediciones en tanques donde no es factible realizar mediciones directas (por ejemplo, un tanque que cuente con demasiada turbidez).

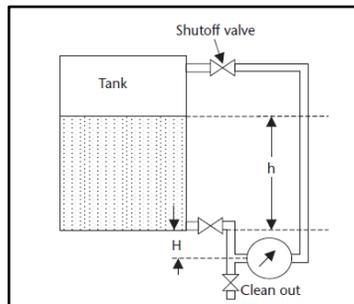
- Medición de presión: Es el método indirecto más utilizado para medir el nivel, ya que aumenta a medida que aumenta la profundidad. La presión viene dada por:

$$p = \gamma h$$

Donde p = presión, γ es el peso específico y h es la profundidad. Debe tomarse en cuenta que el peso específico depende de la temperatura por lo que debe medirse de manera consistente.

La presión puede medirse por cualquiera de los métodos indicados anteriormente, son afectados por la suciedad y por la densidad del líquido.

Figura 14. **Medición indirecta de líquido por método de presión**



Fuente: DUNN, W. *Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control*. p. 56.

- Medición de capacitancia: es otro método muy utilizado en la industria. Se basa en medir la capacidad del condensador formado por un electrodo sumergido en el líquido y las paredes del tanque. Cuando las placas del capacitor están parcialmente inmersas en un líquido no conductor la capacitancia está dada por:

$$C = C_a \mu \frac{d}{r} + C_a$$

Donde C_a es la capacitancia sin líquido, μ es la constante dieléctrica del líquido entre las placas, r es la altura de las placas y d el nivel de líquido entre placas.

La medición se realiza mediante una señal de radiofrecuencia aplicada entre la pared del tanque y el electrodo. La señal de radiofrecuencia produce una corriente que viaja del líquido a las paredes del tanque (como puede

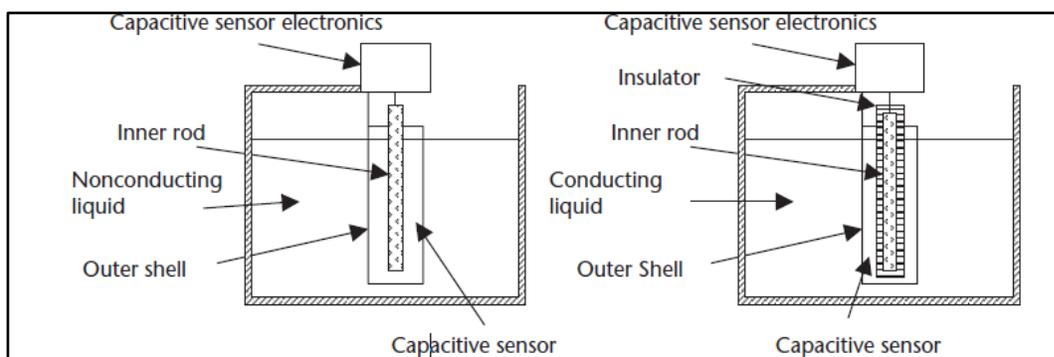
observarse en la figura, la pared del tanque debe ser de un material conductor, en caso no lo sea, puede colocarse un segundo electrodo en paralelo al principal).

Cuando el nivel baja, también disminuye la constante dieléctrica, debido a que la corriente ya no pasa por el líquido, sino por aire, lo que provoca que, a su vez, disminuya la capacitancia y la corriente inducida.

La constante dieléctrica depende de la temperatura, consistencia del líquido, humedad y densidad, no puede ser utilizado en líquidos sucios ya que pueden recubrir el electrodo, produciendo error en la medición.

Su construcción generalmente es en acero inoxidable de $\frac{1}{2}$ " o $\frac{1}{4}$ " de diámetro. Cuando el líquido es conductor, el electrodo debe recubrirse para evitar posibles errores causados por corrientes parásitas debido a falsas capacitancias, el circuito electrónico puede tener una salida en 4-20 mA.

Figura 15. **Sensor capacitivo para líquidos conductivos y no conductivos**

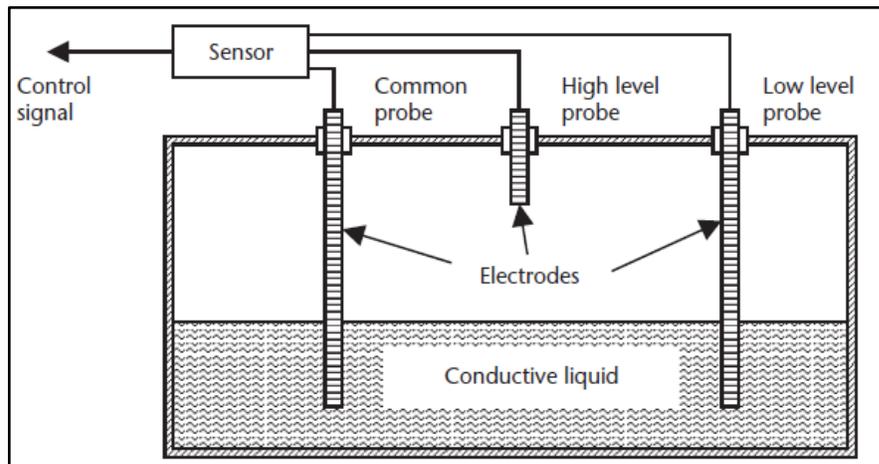


Fuente: DUNN, W. *Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control*. p. 56.

- Medición de nivel en un punto: Se utiliza en aplicaciones que únicamente necesitan dos estados (encendido/apagado). Cuando la medición se realiza en un líquido conductor, se utilizan sondas conductoras; se utilizan sondas térmicas cuando el líquido es no conductor. La sonda térmica consiste en un sensor de temperatura, cuando el líquido se eleva al nivel de la sonda, el calor se disipa, lo que provoca que la temperatura disminuya.

Es posible utilizar una o más sondas que indiquen distintos niveles establecidos; el voltaje entre dos sondas causa una corriente que advierte que se ha alcanzado cierto nivel y sea posible activar un sistema de bombeo para llenar el contenedor; puede utilizarse una tercera sonda para detener la operación al momento de llegar a un nivel deseado.

Figura 16. **Sondas de alto, común y bajo nivel**



Fuente: DUNN, W. *Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control*. p. 58.

1.2.4. Temperatura

La temperatura es uno de los parámetros más importantes en un proceso industrial, ya que como se observó anteriormente, afecta directamente al resto de parámetros de este. Existen diversos fenómenos influidos por la temperatura y que pueden ser aprovechados para medirla:

- Variaciones en volumen o forma de los cuerpos (sensor bimetálico).
- Variación de resistencia de un conductor (sonda de resistencia).
- La fuerza electromotriz creada en la unión de dos metales distintos (termopar).
- Variación de la resistencia de un semiconductor (termistor).

1.2.4.1. Instrumentos de medición de temperatura

- Sensor de temperatura por variación de resistencia: Como su nombre lo indica, estos sensores varían su resistencia en función de la temperatura, dicha variación es propia de cada elemento de detección. Se les denomina RTD (del inglés *resistance temperature detector*).

Su construcción consiste en un hilo muy fino de conductor bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o cerámica. El conductor posee una característica llamada “coeficiente de temperatura de resistencia”, que expresa la variación de resistencia del conductor por grado que cambia su temperatura.

Su comportamiento puede describirse mediante la siguiente ecuación:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t)$$

En donde: R_t = resistencia en Ω a t °C, R_0 = resistencia en Ω a 0 °C, α = coeficiente de temperatura de la resistencia.

Los materiales que forman el conductor de la resistencia deben poseer ciertas características:

- Alto coeficiente de temperatura de resistencia, mientras más alto sea mayor sensibilidad tendrá.
- Relación lineal resistencia-temperatura.
- Rigidez y ductilidad, para compactibilidad y rapidez de respuesta.

En general, la sonda de resistencia utilizada en la industria tiene una resistencia de 100 Ω a 0°C.

A continuación, se presenta una tabla con las características principales de los elementos más utilizados para la construcción de sondas de resistencia:

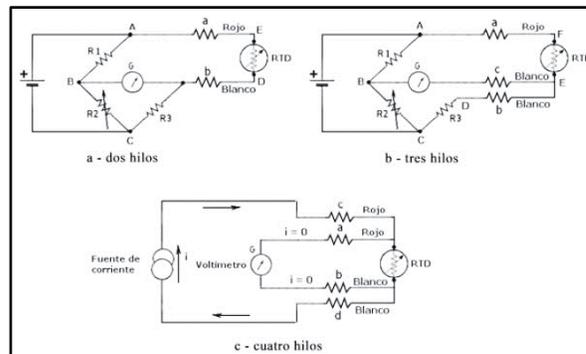
Tabla II. **Características de sondas de resistencia**

Elemento	Intervalo útil de temperaturas (°C)	Resistencia básica	Sensibilidad ($\Omega/^\circ\text{C}$ de 0°C a 100°C)	Coeficiente $\Omega/\Omega \times ^\circ\text{C}$	Ventajas	Desventajas
Platino	-260 a 850	100 Ω a 0°C 1000 Ω a 0°C	0.39 3.90	0.0375 a 0.003927	Mayor intervalo. Mejor estabilidad. Buena linealidad.	Costo
Cobre	-100 a 260	10 Ω a 25°C	0.04	0.00427	Buena linealidad.	Baja resistividad
Níquel	-100 a 260	100 Ω a 0°C 120 Ω a 0°C	0.62 0.81	0.00618 a 0.00672	Bajo coste. Alta sensibilidad.	Falta de linealidad, variaciones de coeficiente de resistencia
Níquel-Hierro	-100 a 204	604 Ω a 0°C	3.13	0.00518 a 0.00527	Bajo coste. Muy alta sensibilidad.	Relación reducida R100/R0

Fuente: CREUS, A. *Instrumentación Industrial*. p. 49.

Para medir la temperatura, se debe hacer circular una corriente por la sonda de resistencia, esto generará una caída de tensión. Posteriormente se conecta la sonda a un puente de Wheatstone convencional u otro circuito convencional de medida de resistencia.

Figura 17. **Conexión de la sonda de resistencia al puente de Wheatstone**



Fuente: CREUS, A. *Instrumentación Industrial*. p. 49.

- Termopares: son los instrumentos de medición de temperatura más utilizados en la industria actual. Su funcionamiento se basa en el efecto Seebeck, que consiste en la generación de corriente eléctrica al someter la unión de dos distintos metales a una diferencia de temperatura.

La circulación de corriente obedece al efecto Peltier, que provoca la liberación de calor en la unión de dos distintos metales cuando una corriente circula a través de la unión y al efecto Thomson que consiste en liberar calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo.

Debido a esto, cuando existe una diferencia de temperatura entre los materiales en unión se desarrolla en el circuito una pequeña tensión continua proporcional a la temperatura de la unión medida.

Los materiales de construcción de los termopares deben desarrollar fuerzas electromagnéticas relativamente altas, poseer alta estabilidad, resistencia eléctrica baja, resistencia alta a la oxidación, corrosión y cristalización.

Cuando el termopar debe estar expuesto a la acción directa de la llama, o la temperatura del proceso es mayor a la que resiste, se emplea un tubo de protección metálico o cerámico el cual debe seleccionarse cuidadosamente a lo que requiera la aplicación. Si la aplicación lo requiere, el termopar puede fabricarse de forma angular o curva cuando los termopares convencionales no proporcionen una medida adecuada de la temperatura.

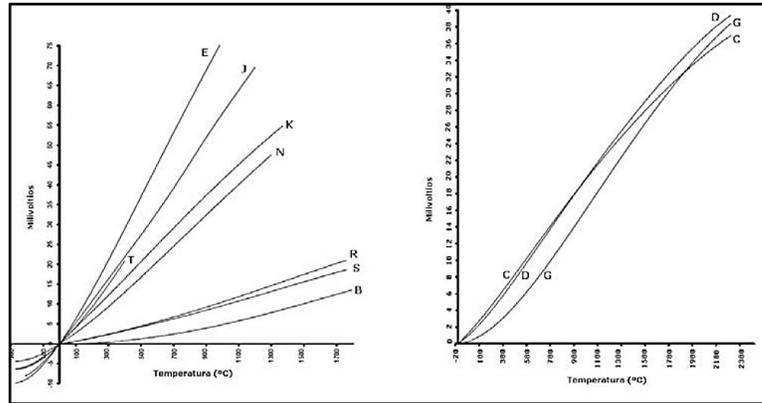
Según su comportamiento y material de fabricación, existen distintos tipos de termopares, los más utilizados a nivel industrial son:

- Termopar tipo K: Es termopar más utilizado en la industria actual, sus materiales de fabricación son Níquel-Cromo/Níquel-Aluminio. Su uso es recomendado para atmósferas oxidantes, no debe ser utilizado en atmósferas sulfurosas. Recomendado para utilizarse a temperaturas entre -40°C y $1,100^{\circ}\text{C}$.
- Termopar tipo J: Sus materiales de fabricación son Hierro/Cobre-Níquel, adecuado para atmósferas inertes y temperaturas entre -200°C y $1,200^{\circ}\text{C}$. Cuando la temperatura aumenta a más de 550°C la oxidación del hilo aumenta rápidamente, por lo que a partir de dicha temperatura se

requiere un mayor diámetro de hilo. También debe tomarse consideraciones en temperaturas menores a 0°C debido a la condensación del agua.

- Termopar tipo T: Sus materiales de fabricación son Cobre/Cobre-Níquel, posee una gran resistencia a la corrosión y puede usarse en atmósferas oxidantes. Su rango de temperaturas está entre -100°C y 260°C.
- Termopar tipo R: Sus materiales de fabricación son Platino 13% Rodio/Platino, se utiliza en atmósferas oxidantes y temperaturas de hasta 1,500°C, es más estable que el termopar tipo S, sin embargo, también posee poca sensibilidad (10µV/°C).
- Termopar tipo S: Sus materiales de fabricación son Platino 10% Rodio/Platino, posee poca sensibilidad(10µV/°C), sus características son similares a las del termopar tipo R.
- Termopar tipo N: Este termopar está protegido con aislamiento de óxido de berilio, se utiliza en atmósferas inertes o en vacío en temperaturas entre 0°C a 2316°C. Poco a poco están ganando terreno en el mercado y actualmente están sustituyendo a los termopares tipo K ya que poseen una mejor estabilidad y resistencia a la oxidación en temperaturas altas.

Figura 18. **Curva característica de los tipos de termopares**



Fuente: CREUS, A. *Instrumentación Industrial*. p. 50.

1.2.5. **Peso**

El peso se define como la fuerza con la que un cuerpo es atraído a la tierra debido a la ley de gravedad. Matemáticamente está dado por la expresión:

$$P = mg$$

La gravedad varía conforme la altura a la que se encuentre el cuerpo sobre el nivel del mar, lo cual afecta la medición en ciertos instrumentos como balanzas, sin embargo, existen otros instrumentos, en los que el peso se mide en comparación con el de otra masa conocida, por lo que la lectura obtenida es independiente del lugar donde es realizada.

Existen distintos dispositivos para medir el peso, sin embargo, nos centraremos únicamente en la balanza electromagnética y la célula de carga debido a que es la única que se utilizará en el sistema a diseñar.

- La báscula electromagnética utiliza un sensor de desplazamiento y una bobina de par montados en un servosistema que equilibra un peso patrón y un peso desconocido. La señal eléctrica de salida puede aplicarse a un microprocesador que proporciona una tara automática.

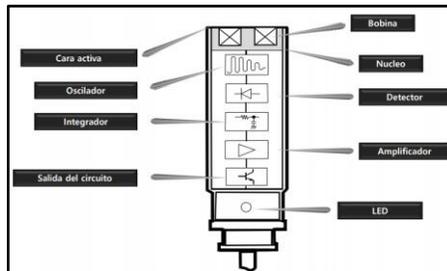
1.2.6. Proximidad

Son sensores muy sencillos, pero a la vez muy utilizados en la industria actual, existen de distintos tipos dependiendo el tipo de aplicación que se requiera.

- Sensor inductivo: Los sensores de proximidad inductivos son ampliamente utilizados en la industria para detectar sin necesidad de contacto objetos metálicos, poseen una alta fiabilidad y precisión, puede llegar a tener un alcance de hasta 2-4 pulgadas de la cara del sensor.

Cuando se acerca un objeto de metal se genera una corriente de Foucault, la cual a su vez genera un campo magnético distinto a la dirección del campo inducido en la bobina. La alteración en el campo magnético genera una corriente eléctrica, la cual es amplificada y mostrada como señal de salida, indicando que la presencia del metal.

Figura 19. Partes de un sensor inductivo



Fuente: *Partes de sensor inductivo*. <http://dominion.com.mx/descargas/sensores-de-proximidad.pdf>. Consulta: 19 de noviembre de 2018.

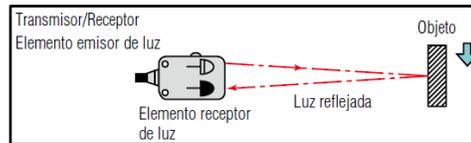
El sensor inductivo puede ser de 2 hilos, donde habría que tomar en cuenta si se desea normalmente abierto o normalmente cerrado.

Si el sensor es de 3 hilos, debe considerarse si se desea con salida PNP o NPN, así como si es normalmente abierto o normalmente cerrado.

- Sensor fotoeléctrico: Es un dispositivo que utiliza la emisión/recepción de luz para detectar el paso de un objeto, es muy utilizado en aplicaciones de conteo y detectar obstrucciones en portones automáticos.

En la parte del emisor se produce un haz de luz (visible o infrarrojo), el cual es reflejado por un accesorio hacia el receptor. En el modelo reflectivo, el emisor y receptor están contenidos dentro de la misma carcasa, y el sensor recibe la luz reflejada del objeto, en este caso debe tomarse en cuenta el alcance, ya que por lo regular es muy limitado.

Figura 20. **Sensor fotoeléctrico reflectivo**

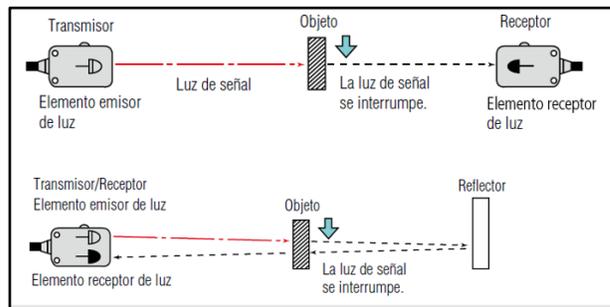


Fuente: *Sensor fotoeléctrico reflectivo.*

<https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/photoelectric/info/>. Consulta: 19 de noviembre de 2018.

En el modelo de barrera el emisor y receptor están separados, y cuando un objeto pasa interrumpe la señal.

Figura 21. **Sensor fotoeléctrico de barrera**

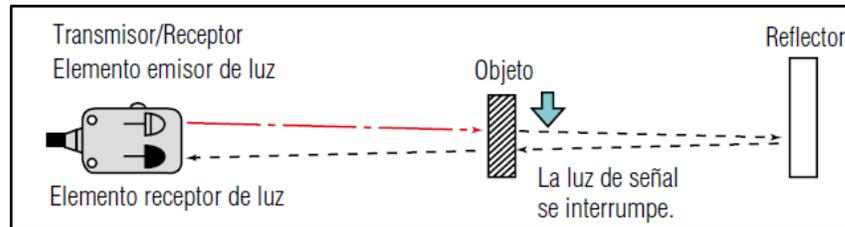


Fuente: *Sensor fotoeléctrico de barrera.*

<https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/photoelectric/info/>. Consulta: 19 de noviembre de 2018.

El modelo retro reflectivo contiene el emisor y el receptor en la misma carcasa, el emisor produce un haz de luz y un reflector al otro extremo redirige la señal hacia el receptor. El sensor se activa cuando el objeto pasa a través del haz e interrumpe la señal.

Figura 22. **Sensor retro reflectivo**



Fuente: *Sensor retro reflectivo.*

<https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/photoelectric/info/>. Consulta: 20 de noviembre de 2018.

1.2.7. **Densidad**

La densidad es un parámetro que se define como masa por unidad de volumen, por lo regular se expresa en g/cm^3 o Kg/m^3 . Varía conforme a la temperatura y la presión. Uno de los equipos más utilizados en la actualidad para medir la densidad es el aerómetro, que consiste en un flotador fijo con un vástago superior graduado. El aparato se sumerge hasta que su peso es equilibrado por el líquido, hundiéndose más cuando menor es la densidad del líquido. Puede incorporarse al mecanismo un transductor de inductancia variable con armadura fija en la parte inferior del flotador para transmitir la densidad en forma de señal eléctrica. Generalmente tienen una exactitud de $\pm 1\%$ a $\pm 3\%$, y soporta una temperatura de hasta 230°C .

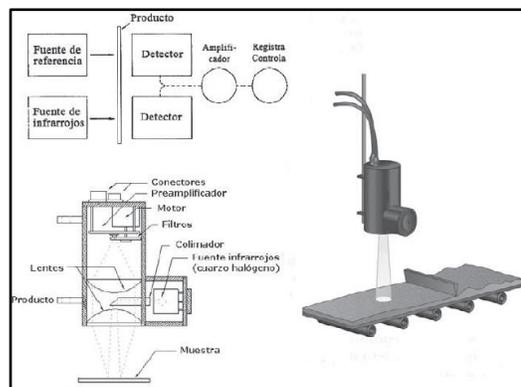
1.2.8. **Humedad**

La Medición de humedad es importante en el proceso de fabricación de cartones para determinar que el producto final está listo para almacenarse; existen distintos métodos para realizar dicha comprobación, sin embargo,

debido a características importantes como costo y el hecho de ser un equipo no intrusivo, el método de infrarrojo será el utilizado en el proceso.

El método de infrarrojo es ampliamente utilizado en la fabricación de papel, una fuente emite un haz de rayos hacia la superficie del material, la onda emitida es de tal tipo que el agua contenida en el producto absorbe la máxima radiación infrarroja mientras que la celulosa absorbe el mínimo. Posteriormente un detector capta la radiación que atraviesa el material e indica la humedad correspondiente. Para evitar variaciones debido al espesor del material y la posición del emisor y detector, se utiliza una fuente adicional que actúa como referencia.

Figura 23. **Medida de humedad por infrarrojo**



Fuente: CREUS, A. *Instrumentación Industrial*. p. 52.

1.2.9. **Consistencia**

La consistencia representa la resistencia que el fluido ofrece al flujo o a la deformación cuando hay un esfuerzo constante. En la industria papelera, la

consistencia designa la proporción entre el peso de materia o fibra seca y el peso total de los sólidos más el agua que los transporta.

$$\text{Consistencia}(\%) = \frac{\text{Peso de sólidos secos (Kg)}}{\text{Peso de sólidos secos (Kg)} + \text{Peso de agua (Kg)}} \times 100$$

Para medir la consistencia se utiliza un medidor de paleta, el cual consiste en una paleta especial situada dentro del fluido, la paleta mide el esfuerzo cortante, despreciando la influencia de las fuerzas de impacto y rozamiento gracias a su forma física. Posteriormente se envía una señal proporcional a la magnitud del esfuerzo medio de un transmisor electrónico digital.

Figura 24. **Medidor de consistencia tipo paleta**



Fuente: *Medidor de consistencia*. <https://www.es.endress.com/es/prensa/noticias-y-notas-de-prensa/detector-nivel-paleta-rotativa>. Consulta: 21 de noviembre de 2018.

1.2.10. Temporizadores

Los temporizadores son instrumentos electrónicos con los que se puede regular la conexión o desconexión de un circuito eléctrico después de que transcurre el tiempo que fue programado. Su funcionamiento consta de un

contador binario, el cual se encarga de medir los pulsos suministrados por un circuito oscilador.

Existen distintos tipos de temporizadores, incluso en algunos casos en vez de colocar un dispositivo como tal, se opta por utilizar el que traen las funciones en

Los principales modos de funcionamiento de un temporizador a utilizar son los siguientes:

- Temporizador con retardo a la conexión: En este el relé de salida se conecta determinado tiempo después del instante de conexión de su bobina.

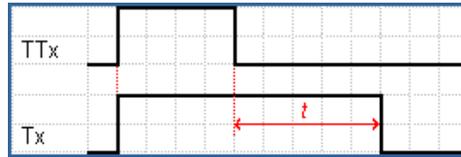
Figura 25. **Retardo a la conexión**



Fuente: elaboración propia, empleando Zelio Soft 2.

- Temporizador con retardo a la desconexión: En este modo el relé de salida de desconecta determinado tiempo después del instante de desconexión de la bobina.

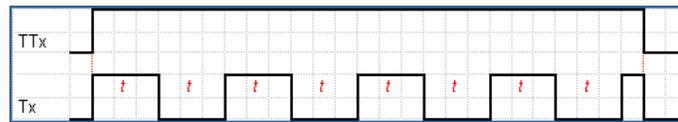
Figura 26. Retardo a la desconexión



Fuente: elaboración propia, empleando Zelio Soft 2.

- Temporizador intermitente: En este caso, el temporizador cambiará de estado periódicamente según el tiempo que se le indique, dicho modo será de gran utilidad para la activación de alarmas audibles y visuales posteriormente.

Figura 27. Temporizador intermitente



Fuente: elaboración propia, empleando Zelio Soft 2.

Cabe resaltar que existen muchos otros tipos de modalidades de los temporizadores, sin embargo, estos son los que se utilizarán en la propuesta del diseño.

2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN EN PROCESO DE ELABORACIÓN DE CARTÓN

El proceso de elaboración de cartón moldeado consta de distintas etapas, en las cuales se necesita monitorear una gran variedad de parámetros para asegurar que el producto final sea elaborado correctamente.

En la presente sección se indicará paso a paso el proceso de producción, así como las características y parámetros que se debe tomar en cuenta, hasta llegar al producto final. Al final de cada explicación del proceso se presentará el listado de señales de campo correspondientes al área.

2.1. Listado de señales de campo

Se utiliza para en los instrumentos en un sistema automatizado, con el propósito de identificar de forma descriptiva datos importantes de cada aparato como el proceso al que pertenece, número de equipo, variable monitoreada, ubicación dentro de la línea de producción, tipo de señal, etc.

Cada instrumento se identifica utilizando una etiqueta o “TAG” alfanumérica que consta de tres partes:

- Variable de proceso: Su identificación se realiza en según la función que tiene el instrumento dentro de la línea de producción, basado en las normas ISA-S5.1(revisión 1992).

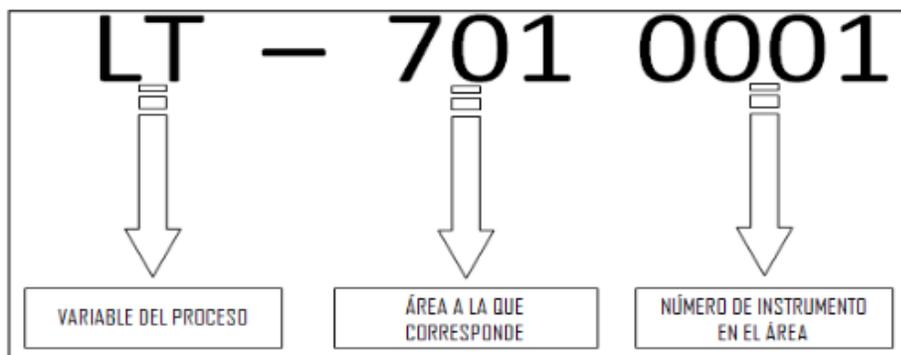
Tabla III. Letras de identificación para instrumentos de campo

	Primera Letra		Letras Sucesivas		
	Variable medida	Modificador	Función de lectura	Función de salida	Modificador
A	Análisis		Alarma		
B	Quemador, combustión		Selección del usuario	usuario	usuario
C	Selección del usuario			Controlador	
D	Selección del usuario	Diferencial			
E	Tensión		Sensor (elemento primario)		
F	Rata de flujo	Relación			
G	Selección del usuario		Dispositivo de vidrio, mirilla		
H	Manual				Alto
I	Corriente (eléctrica)		Indicación		
J	Potencia	Muestreo			
K	Tiempo	Rata de tiempo		Estación de control	
L	Nivel		Luz		Bajo
M	Humedad	Momentáneo			Medio, intermedio
N	Selección del usuario		Selección del usuario	Selección del usuario	
O	Selección del usuario		Orificio, restricción		
P	Presión, vacío		Punto de prueba		
Q	Cantidad	Integrador, total.			
R	Radiación		Registrador		
S	Velocidad, frecuencia	Safety		Interruptor	
T	Temperatura			Transmisor	
U	Multivariable		Multifunción	Multifunción	Multifunción
V	Vibración, análisis			Válvula, damper	
W	Peso, fuerza		Vaina o pozo térmico		
X	Sin clasificar	Eje X	Sin clasificar	Sin clasificar	Sin clasificar
Y	Evento o estado	Eje Y		Relé, convertidor	
Z	Posición, dimensión	Eje Z		Elemento final,	

Fuente: ANSI/ISA-S5.1-1984, *Instrumentation symbols and identification*. p. 128.

- Área correspondiente: Se refiere a la ubicación física o del proceso con el que se identifica, el cual estará dado por los planos del proceso en el cual se identifica cada área.
- Número de instrumento en el área: cuando el área tiene más de un instrumento del mismo tipo se utiliza este número para darle a cada uno un punto de distinción.

Figura 28. **Nomenclatura para identificar un instrumento**



Fuente: CHAMALÉ, N. *Diseño de un sistema de control aplicable en una planta de tratamiento de agua residual*. p. 62.

Para facilitar el proceso de selección de módulos de entradas y salidas del Controlador Lógico Programable, en el listado de señales de campo se indicará el tipo de señal a utilizar, siendo esta una entrada analógica (AI), salida analógica (AO), entrada digital (DI), salida digital (DO) o termorresistencia (RTD).

Se debe considerar que, dependiendo del número de entradas/salidas analógicas/digitales o RTD, se seleccionará un Controlador Lógico Programable

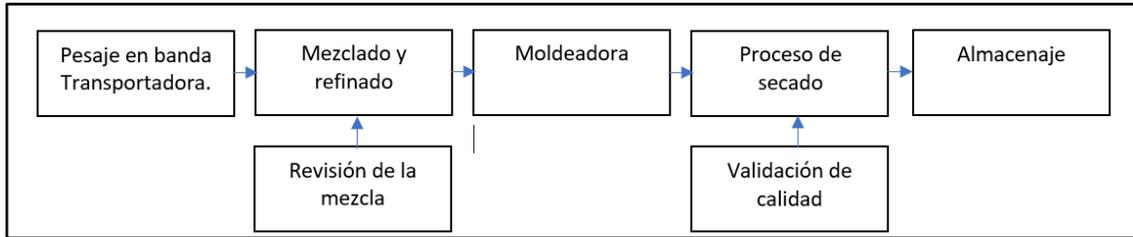
con la capacidad de soportar el procesamiento de todas las señales, por lo que realmente es un proceso crítico realizar la selección de manera adecuada.

- La señal analógica: se observa en instrumentos cuya variación de voltaje es variable y continua en el tiempo, por lo regular esa variación de la señal es proporcional a la magnitud medida, la señal más utilizada en la industria actual es la de 4-20mA. Entre estas medidas podemos encontrar la presión y caudal. Los PLC tienen capacidad para un número considerable de módulos de entradas/salidas analógicas.
- Señal digital: Se caracteriza por tener niveles de voltaje discretos, por ejemplo, si se tiene 24V se representa como un “1” lógico, mientras que 0V se interpreta como un “0”. Un PLC tiene capacidad considerable de módulos de entradas y salidas digitales.
- Señal de temperatura: Debido a que estos no trabajan con variaciones de voltaje ni corriente, sino de resistencia, los módulos utilizados para su medición son considerados por aparte.

2.2. Descripción del proceso

De forma general, el proceso inicia colocando la mezcla de papel en la banda transportadora, que posteriormente se traslada a un contenedor donde se mezcla con el resto de los materiales y agua. Luego de mezclar y refinar la mezcla, pasa por un proceso de secado hasta obtener una pasta, que posteriormente es llevada a la moldeadora, donde se le da la forma final. Una vez terminado el proceso, se traslada el producto a los hornos donde termina de secarse la pasta y se agrupa en lotes para su revisión y almacenaje.

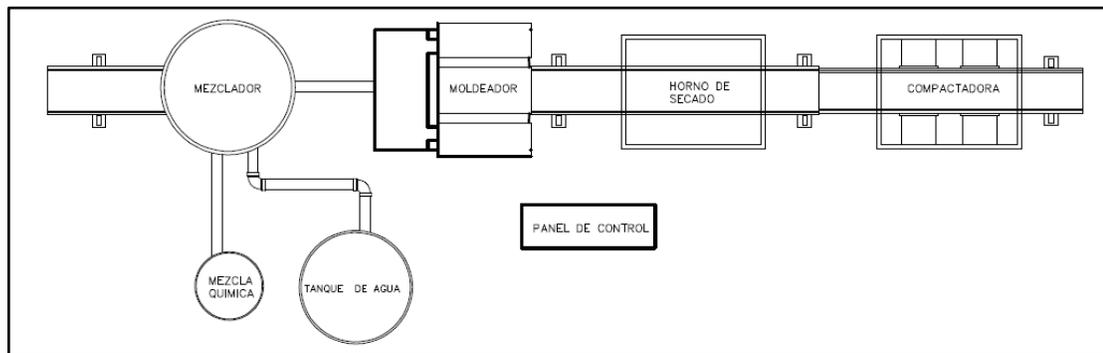
Figura 29. **Etapas del proceso de producción de cartones moldeados**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Para una mejor comprensión a continuación se muestra cómo se vería la línea de producción en un espacio físico:

Figura 30. **Producción de cartones moldeados**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

A continuación, se procederá a enumerar las etapas del proceso para facilitar el etiquetado de los equipos:

Tabla IV. **Asignación de áreas de proceso**

Número de área asignado	Proceso
101	Pesaje en banda transportadora
102	Mezclado y refinado
103	Moldeado
104	Secado
105	Almacenaje
106	Variables Adicionales
107	Variables Eléctricas

Fuente: elaboración propia.

2.2.1. **Pesaje en banda transportadora**

El proceso inicia colocando en la banda transportadora los distintos tipos de cartón que posteriormente se trasladarán al contenedor. Para cada lote se requiere distintos tipos de cartón en ciertos porcentajes los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla V. **Porcentaje de tipo de cartón**

Tipo de cartón	Porcentaje	Peso (Kg)
Periódico	80 %	205
Cartoncillo	10 %	26
Cartulina	5 %	13
Revista	3 %	8
Cartón	2 %	5
Total	100 %	256

Fuente: BENÍTEZ, J. A.; MONTES, M. A. *Estudio de factibilidad técnica financiera para la fabricación de cartones para empaque de huevos usando papel reciclado.* p. 49.

Mientras el cartón es pesado y colocado en la banda, se inicia el proceso de llenado de agua a 55°C en el contenedor principal, lo cual se realiza por medio de una válvula de 2" de diámetro, cuando se ha depositado 5m³ de agua, se cierra la válvula y se procede a corroborar y validar la temperatura.

Posteriormente se activa el desfibrador del contenedor principal y la banda transportadora para iniciar el proceso de mezclado.

En el caso de este proceso en particular, se desea monitorear automáticamente distintas variables:

- **Peso del material de la banda:** Utilizando una báscula electromecánica con comunicación RS232 (la máquina trae la comunicación de fábrica), se registrará el peso de los materiales y al momento de llegar al peso indicado.

La visualización del peso se realizará mediante una pantalla HMI (donde indicará el peso actual) y utilizando cuatro indicadores que se accionarán dependiendo del estado del proceso:

Tabla VI. **Indicadores de alerta según estado de la señal de la banda**

Indicador	Estado
Luz ámbar	Peso bajo
Luz verde	Peso dentro del rango adecuado
Rojo intermitente + Sirena audible	Sobrepeso

Fuente: elaboración propia.

Los estados de la tabla anterior se manejarán con un margen de 5% de error para cambiar de un estado a otro, estos estados se calcularán en base a los datos de la tabla 2.2.

- Nivel de agua en contenedor: Al accionar un botón se dará inicio al proceso de llenado del tanque. Utilizando un transductor se monitoreará el nivel de agua en el contenedor, se indicará mediante un indicador y en la HMI cuando el nivel de agua haya llegado al requerido (1/3 de la capacidad del tanque) y una válvula automática debe regular o interrumpir el flujo de agua.

Si por algún motivo, el nivel de agua es mayor al necesitado, se activará una luz color roja y se accionará la bomba de drenaje hasta llegar al nivel solicitado, posteriormente se encenderá la luz verde y se apagará la bomba.

El nivel de llenado del tanque puede variar dependiendo de las proporciones de materiales y/o tamaño de lote.

Tabla VII. **Indicadores de alerta según nivel de contenedor**

Indicador	Estado	Acciones
Luz ámbar	Nivel bajo	Bomba de llenado en funcionamiento y electroválvula abierta.
Luz verde	Nivel adecuado	Se apaga la bomba de llenado/drenaje y se cierra la electroválvula.
Luz roja intermitente	Nivel elevado	Se enciende la bomba de drenaje.

Fuente: elaboración propia.

- Temperatura del agua del contenedor: Debe monitorearse la temperatura del agua, que debe estar en un rango de 55°C a 60°C, en caso la temperatura descienda, debe mostrarse una alarma visual para que los operarios manualmente revisen el calentador de agua; en caso la temperatura sea mayor al rango establecido, debe mostrarse una alarma visual y desactivarse el calentador, posteriormente se mezclará durante cierto tiempo hasta que la temperatura llegue al rango deseado.

Tabla VIII. **Indicadores de alerta según temperatura del contenedor**

Indicador	Estado	Acciones
Luz ámbar	Temperatura baja (<50°C)	Se indicará el problema en la pantalla y se encenderá una alarma para que los operarios verifiquen el funcionamiento del calentador.
Luz verde	Temperatura adecuada (55-60°C)	Se mantiene la luz verde
Luz roja	Temperatura alta (>60°C)	Se procede a apagar el calentador y se mezcla hasta que la temperatura haya llegado al rango aceptado.

Fuente: elaboración propia.

- Velocidad de la banda: Debe mostrarse en una pantalla la velocidad a la que está trabajando la banda transportadora. No es necesario de monitorear, únicamente el usuario puede escoger entre las 3 velocidades disponibles en el tablero de la banda. A continuación, se presenta el listado de señales de campo de la sección:

Tabla IX. Listado de señales de campo del área de pesaje

TAG	Descripción	AI	AO	DI	DO	RTD
WE-101-001	Peso del material en la banda	X				
XI-101-001	Luz piloto ámbar				X	
XI-101-002	Luz piloto verde				X	
XI-101-003	Luz piloto roja				X	
XI-101-004	Sirena				X	
LE-101-001	Medidor de nivel	X				
XI-101-005	Luz piloto ámbar				X	
XI-101-006	Luz piloto verde				X	
XI-101-007	Luz piloto roja				X	
GC-101-001	Bomba de llenado		X			
GC-101-002	Bomba de drenaje		X			
FC-101-001	Electroválvula		X			
TE-101-001	Medidor de temperatura					X
XI-101-008	Luz piloto ámbar				X	
XI-101-009	Luz piloto verde				X	
XI-101-010	Luz piloto roja				X	
XC-101-001	Señal a calentador		X			
	TOTAL	2	4	0	10	1

Fuente: elaboración propia.

2.2.2. Mezclado y refinado

Este proceso se separa en dos etapas; la primera que consiste en agregar a la mezcla del contenedor carbonato de calcio y la segunda, que consiste en el refinamiento de la mezcla en el contenedor.

- Cuando se tiene los materiales completos dentro del contenedor principal, se agrega a la mezcla 30 litros de carbonato de calcio, proveniente de un contenedor secundario, esto por medio de una tubería de 2" de acero inoxidable; la cantidad de mezcla añadida al contenedor principal se medirá utilizando un medidor de flujo conectado a la tubería anteriormente mencionada.

El contenedor de Carbonato de Calcio contará con un medidor de nivel, ya que se debe asegurar que, al momento de estar en el proceso de producción, se cuente con la cantidad de carbonato de calcio necesario para al menos un lote de producto.

En cuanto el nivel llegue al valor mínimo, se mostrará una alarma para que los operarios procedan a realizar más mezcla. Esta alerta debe ser de carácter preventivo, por lo que no se deberá proceder a realizar un nuevo lote hasta contar con Carbonato de Calcio. La sirena podrá desactivarse manualmente, sin embargo, la luz roja no se desactivará hasta que el nivel del líquido sea el adecuado.

Tabla X. **Indicadores de alerta en contenedor de Carbonato de Calcio**

Indicador	Estado	Acciones
Luz roja intermitente + Sirena audible	Nivel Bajo en contenedor de Carbonato de Calcio	Se activa la luz roja intermitente y una sirena audible para que los operarios
Luz verde	Nivel adecuado de contenedor de Carbonato de Calcio	Se activa la luz verde que indica que el nivel es adecuado
Luz azul intermitente	Agregando Carbonato de Calcio	Se abre la electroválvula para agregar Carbonato de Calcio al contenedor principal, al llegar a la cantidad indicada (30 litros) se cierra automáticamente.

Fuente: elaboración propia.

- Luego de verter el Carbonato de Calcio en el contenedor principal, se procede a refinar la mezcla completa. En el proceso se separan los

sólidos extraños debido al efecto de torbellino formado por la diferencia de presiones con que ingresan el agua y el papel. Las materias sólidas van a la parte baja del contenedor.

El desfibrador procesa la pasta para lograr una pasta más fina. En esta etapa la mezcla es desmenuzada por una gran hélice ubicada en la parte inferior del desfibrador, la temperatura de la mezcla en el proceso debe ser de 45-50°C.

El proceso dura de 8 a 10 minutos, se desea monitorear el tiempo que se mezclará la pasta en el contenedor principal, utilizando un temporizador y mostrando el resultado en una HMI, de igual manera cuando el tiempo haya culminado, se desea mostrar una alarma audible y visual.

Desde el inicio del proceso, en intervalos de 5 minutos se tomará muestras de la temperatura de la mezcla utilizando un termopar, si la temperatura es menor a 45°C, se procederá a mostrar una alarma visual y audible para que un operario manualmente corrija este parámetro del calentador, sin embargo, el proceso no se detendrá. Si la temperatura es superior a 45°C, se procederá a mostrar una alarma de distinto color y se apagará el calentador. En todo momento el valor de temperatura será desplegado en una HMI.

Tabla XI. **Indicadores de alerta de temperatura**

Indicador	Estado	Acciones
Luz verde	Máquina mezclando	Los motores permanecen encendidos a la velocidad establecida.
Luz roja + Sirena audible	Temperatura >50°C	Se enciende la luz piloto color rojo y se apaga el calentador, se adiciona 5 minutos más al proceso de mezclado a manera que la temperatura baje.
Luz ámbar + Sirena audible	Temperatura <50°C	Se enciende la luz piloto color ámbar y se apagará automáticamente el calentador.
Luz azul	Máquina detenida	Finalizado el tiempo de mezclado, se enciende la luz piloto color azul, se abre la válvula de vaciado que lleva la mezcla al siguiente proceso.

Fuente: elaboración propia.

Debe determinarse si la densidad y consistencia de la mezcla es la requerida, la consistencia debe estar en un rango de 100mPa-s a 8,000mPas. Luego de 10 minutos de iniciado el proceso, se tomará una muestra para determinar el estado de la consistencia.

Si la consistencia es menor al rango solicitado, se procederá a encender una alarma visual y audible para que los operarios, manualmente coloquen un 5 % adicional de cada material la mezcla. Si la consistencia es mayor al rango solicitado, por medio de una válvula se añadirá automáticamente un 5 % de agua a la mezcla y se mostrará una alarma visual. El temporizador se detendrá durante el tiempo en que se corrige la desviación, cuando la consistencia es mayor el temporizador se reanuda automáticamente, sin embargo, cuando la

consistencia es menor se necesita de un operario que indique que ya se tomó acción.

El proceso de medición de consistencia se repetirá 2 minutos después de que se haya tomado acción y si continúa fuera del rango, se repetirá el proceso. En caso se solucione la desviación, se apagarán las alarmas y el proceso continuará con normalidad. A continuación, se explica de manera más detallada el proceso de indicadores de consistencia:

Tabla XII. **Indicadores de alerta de consistencia**

Indicador	Estado	Acciones
Rojo intermitente + sirena	Consistencia >1,2 %	Se pausará el temporizador y se encenderá de forma intermitente una luz piloto roja y una sirena para indicar a los operarios que deben añadir materiales a la mezcla. La sirena puede apagarse mediante un botón asignado.
Verde	Máquina mezclando	Los motores permanecen encendidos a la velocidad establecida, el temporizador realiza su conteo normal.
Amarillo intermitente + Sirena	Consistencia <0,8 %	Se pausará el temporizador y se encenderá de forma intermitente una luz piloto amarilla y una sirena, adicionalmente se activa una electroválvula que verte agua a la mezcla. La sirena puede apagarse mediante un botón asignado.

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presenta el listado de señales de campo para el proceso completo:

Tabla XIII. **Listado de señales en área de mezclado y refinado**

TAG	Descripción	AI	AO	DI	DO	RTD
FE-102-001	Medidor de flujo de Carbonato de Calcio	X				
XC-102-001	Botón inicio de descarga			X		
FC-102-001	Electroválvula a contenedor principal		X			
GC-102-001	Bomba a contenedor principal		X			
LE-102-001	Medidor de nivel en contenedor de Carbonato de Calcio	X				
XI-102-001	Nivel bajo				X	
XI-102-002	Sirena				X	
XI-102-003	Nivel adecuado				X	
XC-102-002	Botón para silenciar la sirena			X		
TE-102-001	Medidor de temperatura en contenedor de Carbonato de Calcio					X
XI-102-004	Nivel adecuado				X	
XI-102-005	Nivel alto				X	
XI-102-006	Nivel bajo				X	
XC-102-003	Relé de control de calentador			X		
XI-102-007	Indicador vaciado de máquina				X	
GC-102-002	Bomba de drenaje		X			
XE-102-001	Medidor de consistencia	X				
XI-102-008	Nivel alto				X	
XI-102-009	Nivel bajo				X	
FC-102-002	Electroválvula agua potable		X			
GC-102-003	Bomba de llenado		X			
XC-102-004	Botón apagar sirena			X		
	TOTAL:	3	5	4	9	1

Fuente: elaboración propia.

2.2.3. **Proceso de moldeado**

Al finalizar el proceso de refinado, se bombea la mezcla utilizando una bomba de vacío, una válvula automática dosifica la cantidad de pulpa que ingresa al tanque de acuerdo con lo solicitado.

Se activa el vacío y la transferencia hacia el molde, en este proceso se necesita una temperatura de 250-270°C. Al estabilizar la cantidad de pasta y velocidad de la moldeadora, deben revisarse los parámetros de secado (propios

de la máquina), así como la presión de vacío para mantener constante el proceso de trabajo.

Tabla XIV. **Indicadores de alerta de temperatura**

Indicador	Estado	Acciones
Luz roja + sirena	Temperatura >270°C	Se activa la luz roja y la sirena, se desactiva el calentador.
Luz verde	Temperatura adecuada	El proceso se realiza de manera ordinaria.
Luz ámbar + sirena	Temperatura <250°C	Se activa la luz ámbar y la sirena. Se pausa el proceso para que los operarios revisen el calentador.

Fuente: elaboración propia.

Debido a estándares de calidad, debe inspeccionarse que la pasta esté libre de objetos metálicos, por lo que debe adicionarse a la tubería un sistema de detección de metales. Al momento de detectar un objeto metálico, el mecanismo debe mostrar una alarma audiovisual y activar un mecanismo de expulsión de pasta.

Tabla XV. **Indicadores de alerta detección de metales**

Indicador	Estado	Acciones
Luz roja + sirena	Detección de metal	Se activa la luz roja y sirena, se envía la señal para que el mecanismo expulse la mezcla que contiene el metal, posteriormente se reanuda el proceso.
Luz verde	Metal no detectado	El proceso se realiza de manera ordinaria.

Fuente: elaboración propia.

Finalizado lo anterior, se procede a moldear el producto, para lo cual se utiliza una máquina como la mostrada en la figura 3.3, que consiste en moldes girando debido a la acción de un motor; al iniciar el movimiento, la mezcla se prensa dentro de los moldes adquiriendo su forma y simultáneamente a este proceso, las bombas succionan el agua posible de extraer de la mezcla dentro de la moldeadora.

Figura 31. **Moldeadora de cartón**



Fuente: *Moldeadora de cartón*. <https://spanish.alibaba.com/%2Fg%2Fpaper-egg-carton-moulds.html&psig=AOvVaw2jkYsSnh5UubcLIRUwQifC&ust=1525207597640903>. Consulta: 20 de diciembre de 2018.

El proceso consta de tres sistemas de bombas centrífugas, uno de ellos es utilizado para succionar la mezcla y alimentar la moldeadora, otro se encarga de formar el vacío en los ductos de soplado para extraer agua de la mezcla y el último es utilizado para transportar el agua extraída para su reutilización.

Tabla XVI. **Indicadores de alerta de presión**

Indicador	Estado	Acciones
Luz roja intermitente + sirena	Presión <65 mbar	Se activa una luz roja de forma intermitente y la sirena. Se pausa el proceso automáticamente para que se pueda proceder a las revisiones y correcciones respectivas.
Luz roja	Presión (65-70) mbar	Se activa la luz roja y la sirena. Se procede a aumentar la presión de la bomba por medio de un variador de frecuencia.
Luz verde	Presión adecuada	El proceso se realiza de manera ordinaria.
Luz ámbar	Presión (80-85) mbar	Se activa la luz ámbar y la sirena. Se procede a disminuir la presión de la bomba por medio de un variador de frecuencia.
Luz ámbar intermitente + sirena	Presión >85mbar	Se enciende la luz ámbar intermitente y la sirena. Se pausa el proceso para que se pueda proceder a las revisiones y correcciones respectivas.

Fuente: elaboración propia.

Explicado el proceso anterior, se presentará el listado de señales de campo del área de moldeo.

Tabla XVII. **Señales de campo del área de moldeado**

TAG	Descripción	AI	AO	DI	DO	RTD
TE-103-001	Medición de temperatura					X
XI-103-001	Indicación nivel bajo				X	
XI-103-002	Indicación nivel alto				X	
XI-103-003	Indicación nivel adecuado				X	
PE-103-001	Medición de presión bomba 1	X				
PE-103-002	Medición de presión bomba 2	X				
PE-103-003	Medición de presión bomba 3	X				
XI-103-004	Indicación nivel alto				X	
XI-103-005	Indicación nivel bajo				X	
XI-103-006	Indicación nivel adecuado				X	
XI-103-007	Sirena				X	
PC-103-001	Bomba de succión 1		X			
PC-103-002	Bomba de succión 2		X			
PC-103-003	Bomba de succión 3		X			
XS-103-001	Pausar/reanudar proceso			X		
XS-103-002	Apagar sirena			X		
XE-103-001	Detector de metal			X		
XC-103-001	Accionamiento de mecanismo				X	
XI-103-008	Indicación metal detectado				X	
XI-103-009	Indicación metal no detectado				X	
	TOTAL	3	3	3	10	1

Fuente: elaboración propia.

2.2.4. Proceso de secado

Cuando el producto sale de la moldeadora, posee una consistencia sólida y un poco húmeda, por lo que es llevado a través de una banda transportadora hacia un horno para terminar el proceso de secado.

Los cartones ya moldeados ingresan a un horno continuo de paso múltiple de seis capas, el tiempo de permanencia es de 7 minutos a una temperatura de 105-115°C, en este caso en particular, el tiempo de permanencia dependerá de la velocidad de la banda, por lo que ésta será la variable que monitorear.

La temperatura interna del horno se debe mantener en el rango establecido, ya que, si se mantiene a una temperatura inferior, el cartón no se secará adecuadamente y si la temperatura es mayor pueden quemarse los separadores.

Tabla XVIII. **Indicadores de alerta de temperatura en secado**

Indicador	Estado	Acciones
Luz roja + sirena	Temperatura >118 °C	Se activa una alerta visual y audible y se apagará automáticamente el calentador.
Luz roja intermitente	Temperatura (115-118) °C	Se activa la luz roja y la sirena para que los operarios revisen el horno. Se aumenta la velocidad de la banda transportadora en un 10% para de compensar.
Luz verde	Temperatura adecuada	El proceso se realiza de manera ordinaria.
Luz ámbar intermitente	Temperatura <105 °C	Se activa la luz ámbar y la sirena. Se disminuye la velocidad de la banda transportadora en 10% para compensar.
Luz ámbar + sirena	Temperatura <100 °C	Se activa una alerta visual y audible; Se apagará automáticamente el horno y la banda transportadora.

Fuente: Elaboración propia.

De tal manera que el listado de variables de campo en el proceso de secado quedará de la siguiente manera:

Tabla XIX. **Señales de campo del área de secado**

TAG	DESCRIPCIÓN	AI	AO	DI	DO	RTD
TE-104-001	Medición de temperatura					X
XI-104-001	Indicador temperatura alta				X	
XI-104-002	Indicador temperatura baja				X	
XI-104-003	Sirena				X	
SE-104-001	Velocidad banda transportadora		X			
XC-104-001	Contacto apagar horno				X	
	TOTAL:	0	1	0	4	1

Fuente: Elaboración propia.

2.2.5. Almacenaje

Luego del proceso de secado, se procede a apilar los cartones según la cantidad deseada (regularmente de 50 o 100 unidades por pila).

En este proceso se necesita que un sensor realice el conteo del número de cartones a almacenar, debe tomarse en cuenta que la capacidad de detección del sensor debe ser mayor a 75 muestras por minuto.

Posteriormente se transporta la pila a una compactadora vertical donde toma su forma final. En este momento se toma el paquete completo y se coloca dentro de una bolsa, la cual se le debe señalar con su respectivo número de lote.

En el proceso de almacenaje, el listado de variables de campo queda de la siguiente manera:

Tabla XX. **Señales de campo en Proceso de Almacenaje**

TAG	Descripción	AI	AO	DI	DO	RTD
QE-105-001	Sensor de conteo			X		
XC-105-001	Actuador del sensor de conteo				X	
	TOTAL	0	0	1	1	0

Fuente: elaboración propia.

2.2.6. Variables de campo adicionales

Adicionalmente a las variables de proceso indicadas con anterioridad, existen parámetros que son de gran importancia para que el proceso se lleve a cabo exitosamente, razón por la que se desea que el sistema abarque su monitoreo y control.

Se desea medir el estado del aceite de la moldeadora y que posea un indicador visual que se active cuando se necesite su cambio, adicionalmente se necesita medir el nivel actual del aceite, con indicación visual y un indicador audible cuando el nivel descienda respecto al rango establecido.

Se debe monitorear el consumo total de agua de la línea de producción (esto abarca el llenado de cada tanque, el agua adicional que puede utilizarse en cada proceso, el agua utilizada para limpiar los contenedores post-producción, entre otros). El agua ingresa por una tubería de 8" a temperatura ambiente. Se debe monitorear el nivel del tanque de Carbonato de Calcio, así como su temperatura (debe estar en el rango de 55-60°C). De igual forma debe medirse su consistencia.

Adicionalmente se desea controlar el portón de ingreso a bodega, ya que por regulaciones de calidad debe permanecer cerrado.

Tabla XXI. Señales de campo adicionales

TAG	Descripción	AI	AO	DI	DO	RTD
LE-106-001	Nivel de aceite	X				
XE-106-001	Consistencia de aceite	X				
XI-106-001	Indicador de nivel de aceite		X			
FE-106-001	Flujo de agua a la entrada	X				
XC-106-001	Accionador para la electroválvula		X			
XE-106-002	Consistencia en tanque de Carbonato de Calcio	X				
XI-106-002	Indicador de nivel en tanque de Carbonato de Calcio				X	
XI-106-003	Indicador de temperatura en tanque de Carbonato de Calcio				X	
ZE-106-001	Sensor de proximidad de portón de bodega			X		
XC-106-002	Accionamiento de portón de bodega				X	
	TOTAL	4	2	1	3	0

Fuente: elaboración propia.

2.2.7. Variables eléctricas

Las variables eléctricas también son de gran importancia para que la producción de cartones se lleve a cabo exitosamente, ya que, monitorearlas de manera correcta nos da la pauta para detectar señales parásitas que afectan directamente los equipos electrónicos y también nos permiten recopilar datos para mejorar la eficiencia energética.

La medición de variables eléctricas se muestra en un listado diferente a las señales de los instrumentos debido a que no se conectarán directamente a un PLC, sino que son medidas con instrumentos especializados que se detallarán en posteriores capítulos.

Se obtendrá información acerca de la corriente que se consume en la línea de producción, con un histórico para determinar los instantes de mayor consumo.

Se realizará el monitoreo de nivel de voltaje de entrada a la máquina debido a que, en muchos casos, principalmente en el interior de la república, el abastecimiento de energía no es constante, y esto podría dañar los dispositivos o acortar su tiempo de vida.

Se realizará el monitoreo de armónicos en la red que suministra la energía eléctrica y los transitorios ocurridos durante cierto periodo de tiempo.

El resultado de la medición de los parámetros anteriormente mencionados se analizará en capítulos posteriores para determinar las protecciones necesarias para los equipos electrónicos.

Tabla XXII. **Variables eléctricas.**

TAG	Descripción
IE-107-001	Corriente instantánea de la línea de producción.
IE-107-002	Corriente instantánea de calentador.
EE-107-001	Voltaje de entrada en la línea de producción.
EE-107-002	Armónicos dentro de la red.
EE-107-003	Medición de transitorios.

Fuente: elaboración propia.

3. ELABORACIÓN DEL DISEÑO

Se diseñará un sistema de monitoreo y adquisición de datos en base a los datos recopilados en el capítulo anterior, se configurará la comunicación entre los distintos dispositivos empleados en el sistema y se programará los controladores lógicos programables para que realicen el control necesario en cada proceso.

A continuación, se muestra el conteo de variables de entradas/salidas análogas/digitales del proyecto, también se considera su ubicación para determinar la cantidad de módulos de entradas y salidas y capacidad del PLC:

Tabla XXIII. **Resumen de variables por proceso**

Proceso	AI	AO	DI	DO	RTD
Pesaje	2	4	0	10	1
Mezclado y refinado	3	5	4	9	1
Moldeado	3	3	3	10	1
Secado	0	1	0	4	1
Almacenaje	0	0	1	1	0
Adicionales	5	2	1	3	1
Total:	12	15	9	37	4

Fuente: elaboración propia.

En base a la tabla 3.1 y la figura 2.3, se selecciona los dispositivos a utilizar para el diseño del sistema de monitoreo.

3.1. Selección de equipos a utilizar

En la presente sección se realiza la selección de equipos para el sistema a diseñar, se considera los parámetros y especificaciones mínimas necesarias debido a que el sobredimensionamiento de estos conlleva una inversión monetaria mayor.

3.1.1. Controlador lógico programable

Es importante seleccionar el controlador lógico programable adecuado para realizar el sistema, debido a que se encargará de obtener las señales de los instrumentos de medición, procesarlas y en base a ellas realizar la corrección respectiva por medio de los actuadores.

3.1.1.1. Conceptos fundamentales del PLC

Un Controlador Lógico Programable (PLC - Programmable Logic Controller por sus siglas en inglés) es un dispositivo capaz de recibir señales analógicas o digitales, procesarlas y en base a esto generar distintos tipos de salidas.

Existe dos tipos de diseños mecánicos para los PLC, compacto y modular; El modelo compacto tiene integrados la fuente de poder, procesador, memoria y módulos de entradas, salidas y comunicación; el modular, como su nombre lo indica debe agregarse las diversas funciones por medio de módulos independientes.

Un PLC puede programarse desde 5 distintos lenguajes (escalera, funciones secuenciales, diagrama de bloques, texto estructurado y lista de instrucciones).

3.1.1.2. Selección de PLC y módulos adecuados

Existen distintos fabricantes de Controladores Lógicos Programables, entre los principales fabricantes se puede encontrar Siemens, Allen-Bradley, Schneider Electric, Mitsubishi, LG, entre otros; De igual manera, cada fabricante cuenta con distintas gamas de equipos dependiendo de la capacidad de entradas/salidas y el procesamiento.

Se considera el uso de la línea TM221 de Schneider Electric para llevar a cabo el proyecto, debido a su versatilidad y la disponibilidad del software de programación, So Machine Basic, que puede descargarse de la página oficial de Schneider Electric gratuitamente. Posteriormente se conectará a la red, Interfaces Humano Máquina (HMI) para visualización de datos, por lo que se toma en cuenta que los controladores lógicos programables posean comunicación MODBUS y/o Ethernet.

Se utilizará el Controlador TM221M32TK, que es un controlador modular de 16 entradas digitales, 16 salidas a transistor PNP y 2 entradas digitales con alimentación 24VCC, comunicación Ethernet y Modbus TCP. Es importante resaltar que soporta hasta 7 módulos de expansión.

Figura 32. Controlador M221M32TK

Product data sheet
Characteristics

controller M221 32 IO transistor PNP





Main

Range of product	Modicon M221
Product or component type	Logic controller
[Us] rated supply voltage	24 V DC
Discrete input number	16 discrete input conforming to IEC 61131-2 Type 1 including 4 fast input
Analogue input number	2 at input range: 0...10 V
Discrete output type	Transistor
Discrete output number	16 transistor including 2 fast output
Discrete output voltage	24 V DC
Discrete output current	0.1 A

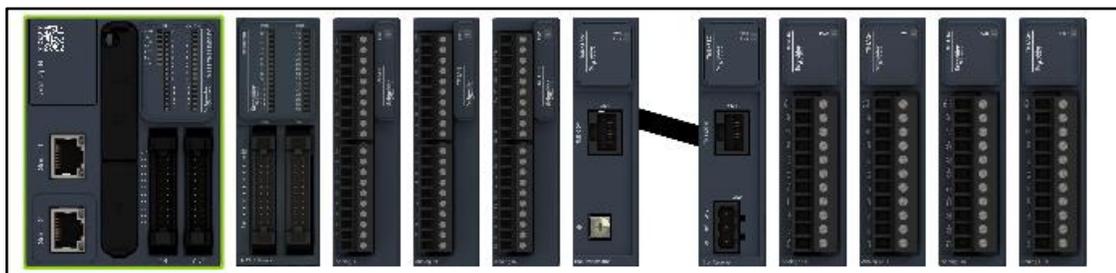
Fuente: *Schneider Electric. TM221M32TK product datasheet. p. 39.*

Los Módulos de entradas y salidas serán se seleccionan en función de la cantidad de variables de la tabla 3.1, cabe mencionar que, para la instrumentación instrumentación, se tomará en cuenta utilizar transmisores en los sensores de temperatura, por lo que las variables RTD, se consideran como entradas analógicas de temperatura.

- Entradas digitales: Se utilizará las entradas digitales del módulo principal, ya que según la tabla 3.1 se necesitan 9 entradas, y el módulo cuenta con 16.

- Salidas digitales: Se utilizará un módulo TM3DQ32TK y el módulo principal para las salidas digitales, ya que según la tabla se necesitan 37 salidas y en conjunto los módulos tienen capacidad para 48.
- Entradas analógicas: Se utilizará dos módulos TM3AI8 para las 12 entradas analógicas que requiere el sistema de tipo tensión/corriente y se utilizará un módulo TM3TI8T para las 4 entradas analógicas tipo temperatura.
- Extensión de módulos: debido a que el número de entradas analógicas sobrepasa el máximo de módulos permitidos por la cabecera, se procederá a utilizar un transmisor TM3XTRA1, para colocar un segundo rack y ampliar la capacidad a 14 módulos; en el segundo rack, se colocará un módulo receptor TM3XREC1, posteriormente se colocarán 4 módulos TM3AQ4 para las 15 salidas digitales.

Figura 33. **Configuración de módulos de entradas/salidas**



Fuente: elaboración propia, empleando So Machine V1.6.

3.1.2. Transductores y actuadores

A continuación, se mostrará el proceso de selección e dispositivos transductores.

3.1.2.1. Proceso de selección dispositivos transductores

En la presente sección se seleccionará los transductores encargados de ingresar las variables del proceso al sistema; esta acción es una de las más importantes dentro del proceso, ya que las acciones correctivas se tomarán en base a los valores captados por dichos dispositivos.

- Peso de material de la banda WE-101-001: La señal será proporcionada directamente por la báscula, que posee una salida de comunicación RS232.
- Medidor de nivel LE-101-001: Para la medición de nivel en el área 101, se considera el transmisor ultrasónico 7ML5221-1AA11, con conexión a 2 hilos, posee características para medición de nivel, volumen y caudal en tanques de almacenamiento y proceso, carcasa de plástico con prensa estopa, 6 metros de alcance, material del sensor PVDF, conexión al proceso 2" NPT, con salida 4-20mA, uso general.

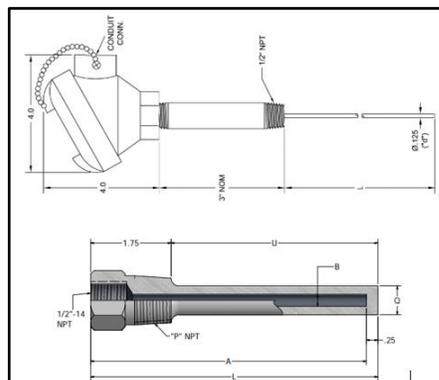
Figura 34. **Sensor ultrasónico de nivel para área 101**



Fuente: Instrumentación de campo para la automatización de procesos, Siemens 2014.

- Medidor de temperatura TE-101-001: Se considera un RTD AH-R-2T3-Px11224X, salida 4-20mA Hart, PT100, NEMA 4/ IP65, con vástago de 24" de longitud, 1/8" de diámetro, rango -51 a 316 °C, con termo pozo de 24" acero inoxidable 316, conexión 1/2" NPT.

Figura 35. **RTD Reotemp AH-R-2T3-PX11224X**



Fuente: *Reotemp instruments configurator*. <https://reotemp.com/configurators/thermocouple-rtd-configurator>. Consulta: 12 de febrero de 2019.

- Medidor de flujo FE-102-001: Se considera el transmisor de flujo marca Siemens 7ME6110-2YA10-1AA2, rango de medida 0-10m/s, diámetro 2", para ambientes estándar no explosivos, electrodo estándar de Hastelloy, salida 4-20mA, temperatura de -40 a +100°C, de acero inoxidable AISI 316, conexión ½ NPT.

Figura 36. **Medidor de caudal Siemens 7ME6110-2YA10-1AA2**



Fuente: Instrumentación de campo para la automatización de procesos, Siemens 2014.

- Medidor de nivel contenedor Carbonato de Calcio LE-102-001: según las dimensiones del contenedor de Carbonato de Calcio, se considerará un medidor de nivel del mismo tipo que en TE-101-001 transmisor ultrasónico 7ML5221-1AA11, con conexión a 2 hilos, posee características para medición de nivel, volumen y caudal en tanques de almacenamiento y proceso, carcasa de plástico con prensa estopa, 6 metros de alcance, material del sensor PVDF, conexión al proceso 2" NPT, con salida 4-20mA, uso general.
- Medidor de temperatura contenedor Carbonato de Calcio TE-102-001 y área de moldeo TE-103-001: debido a las especificaciones del

contenido y del tanque, se considera, al igual que en TE-101-001, una RTD AH-R-2T3-Px11224X, 3 hilos con conexión ½"NPT, salida 4-20mA Hart, PT100, NEMA 4/ IP65, con vástago de 24" de longitud, 1/8" de diámetro, rango -51 a 316 °C, con termo pozo de 24" acero inoxidable 316, conexión ½"NPT.

- Medidor de consistencia XE-102-001: Para la medición de consistencia de la mezcla del tanque, se propone un medidor de consistencia rotacional KC/5-705, rango 1.5-16 %, sensibilidad de hasta 0.003% Cs, carcasa IP66, salida 4-20mA + HART, alimentación 24VDC, temperatura máxima 120°C.

Figura 37. **Transmisor de consistencia rotacional KC/5-705**



Fuente: *KC/5 Rotary Consistency Transmitter Datasheet*

- Medición de presión en bomba 1,2 y 3 PE-103-001, PE-103-002, PE-103-003: Se considera un transmisor para presión diferencial Siemens SITRANS P310, modelo 7MF2433-1DA22-2AC6-ZA01, para un rango de medición entre 0-1 mbar hasta 0-700 bar, precisión de 0.075%, comunicación 4-20mA HART, diafragma de acero inoxidable.

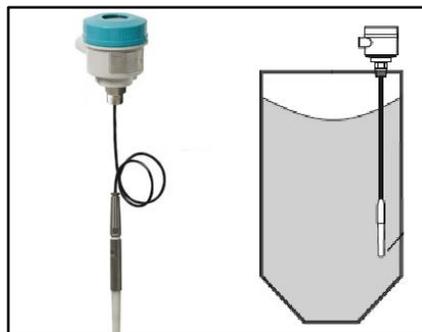
Figura 38. **Transmisor de presión diferencial SITRANS P310**



Fuente: Siemens. *Instrumentación de campo para la automatización de procesos.*

- Nivel de aceite LE-106-001: Se utilizará un sensor de varilla con conexión al proceso por rosca Siemens Pointek CLS200, 7ML5640-0AL031-1BA, con conexión al proceso rosca 1" NPT, varilla longitud 1500mm, sin aislador térmico, temperatura máxima 80°C, sonda de acero inoxidable AISI 316L, con cuerpo de PVDF, salida 0-10V galvánicamente aislada.

Figura 39. **Sensor de varilla Pointek CLS200**



Fuente: Siemens. *Instrumentación de campo para la automatización de procesos.*

- Consistencia de aceite XE-106-001: Para medir la consistencia se utilizará un transmisor de consistencia óptica KPM, con salida 4-20mA,

IP65, alimentación 86-264VAC, rango de 0-5 %, temperatura máxima 90°C.

Figura 40. **Transmisor de consistencia óptico**



Fuente: *KPM Optical Consistency Transmitters Datasheet*. www.Tech.com/transistor/.

Consulta: 15 de enero de 2019.

- Flujo de agua a la entrada FE-106-001: Se considera un caudalímetro Siemens SITRANS 3100 7ME6310-3TJ11-1CB2 de 4" de diámetro DN100, Clase150, alimentación 115-230VAC, salida 4-20mA HART, conexión ½" NPT, temperatura máxima 60°C.
- Medidor de consistencia tanque de Carbonato de Calcio XE-102-002: Para la medición de consistencia de la mezcla del tanque, se propone un medidor de consistencia rotacional KC/5-705, rango 1.5-16 %, sensibilidad de hasta 0.003 % Cs, carcaza IP66, salida 4-20mA + HART, alimentación 24VDC, temperatura máxima 120°C.
- Pulsador inicio de descarga XC-102-001: Se considera un pulsador color verde de 22mm, con un contacto normalmente abierto.

- Pulsador silenciar sirena XC-102-002: Se considera un pulsador color negro de 22mm, con un contacto normalmente abierto.
- Relé de control de calentador XC-102-003: La señal será emitida por la salida a relé que posee el calentador, y conectada directamente a la entrada del PLC. La salida normalmente está en alto y cuando ocurre un suceso pasa a estado bajo (Actuaría como un contacto normalmente cerrado).
- Pausar/Reanudar proceso XS-103-001: Se activa utilizando un selector de dos posiciones fijas, el estado de lado izquierdo será apagado y al girar a la derecha se iniciará el proceso.
- Apagar sirena XS-103-002: Se activa presionando un pulsador de dos estados fijos, con contacto normalmente cerrado.
- Accionamiento de mecanismo XC-103-001: Se activará el mecanismo con un pulsador verde con contacto normalmente abierto.
- Detección de metales XE-103-001: el metal se detecta con el uso de un sensor inductivo modelo NRN75-FP-E2-C-P3-V, normalmente abierto, distancia máxima 55mm, alimentación 10-30VCC, temperatura de operación 0-20 °C, protección IP68.

Figura 41. **Sensor inductivo NRN75-FP-E2-C-P3-V**



Fuente: *Sensor inductivo NRN75-FP-E2-C-P3-V Datasheet*. https://www.pepperl-fuchs.com/global/es/classid_143.htm?view=productdetails&prodid=25800. Consulta: 20 de enero de 2019.

- Sensor de conteo QE-105-001, proximidad portón de bodega ZE-106-001: para el conteo y detección de objetos, se colocará el sensor fotoeléctrico Pepperl + Fuchs, modelo OBS4000-18GM60-E5-V1, alcance 0-4 metros, tensión de trabajo 10-30VDC, colector abierto, conector M12.

Figura 42. **Sensor fotoeléctrico OBS4000**



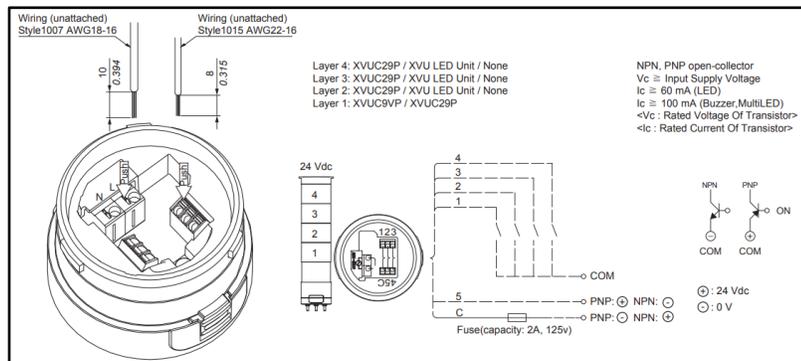
Fuente: *OBS4000-18GM60-E5-V1 Datasheet*. https://www.pepperl-fuchs.com/global/es/classid_11.htm?view=productdetails&prodid=7870. Consulta: 18 de enero de 2019.

3.1.2.2. Proceso de selección de actuadores

A continuación, se muestra el listado de dispositivos indicadores, que constan de distintos colores de luces, a fin de mostrar al usuario el estatus de las variables del proceso; para esto, se utilizará torres luminosas, debido a que estas proveen una mejor visibilidad a los usuarios y facilitan en gran medida el cableado e instalación, ya que cuentan con un neutro común, y todos los cables de control van hacia el mismo módulo.

Estos módulos son configurables, según las luces que se necesiten y se les puede agregar un módulo de alarma audible.

Figura 43. Diagrama de conexión de balizas XVUC



Fuente: XVUC29P Multi-LED unit, *Pulse Signal Instruction Sheet*. p. 44.

Como se observa en el diagrama de la figura 43, internamente el módulo principal de la baliza contiene tres bloques de conexiones; en el bloque de la izquierda, se conecta la alimentación de los módulos con positivo en L y neutro en N. En el bloque inferior se observa un conector común “C” para la conexión del neutro de la señal de control, la señal 4 y 5 se conectan directamente a la

señal de control que encenderá las luminarias que se encuentren en dicha posición, de la misma forma se conecta el boque superior de las luminarias 1, 2 y 3.

A continuación, se muestra el listado de señales que utilizarán estos módulos a la salida.

Tabla XXIV. **Señales de campo balizas área 101**

Señal de campo	Módulo por utilizar	Número de baliza
XI-101-001	Ámbar	BAL_01
XI-101-002	Verde	BAL_01
XI-101-003	Rojo	BAL_01
XI-101-004	Sirena	BAL_01
XI-101-005	Ámbar	BAL_02
XI-101-006	Verde	BAL_02
XI-101-007	Rojo	BAL_02
XI-101-008	Ámbar	BAL_03
XI-101-009	Verde	BAL_03
XI-101-010	Rojo	BAL_03

Fuente: elaboración propia

Tabla XXV. **Señales de campo balizas área 102**

Señal de campo	Módulo por utilizar	Número de baliza
XI-102-001	Rojo	BAL_04
XI-102-002	Sirena	BAL_04
XI-102-003	Verde	BAL_04
XI-102-004	Verde	BAL_05
XI-102-005	Rojo	BAL_05
XI-102-006	Ámbar	BAL_05
XI-102-007	Rojo	BAL_06
XI-102-008	Rojo	BAL_07
XI-102-009	Ámbar	BAL_07

Fuente: elaboración propia

Tabla XXVI. **Señales de campo balizas área 103 y 104**

Señal de campo	Módulo por utilizar	Número de baliza
XI-103-001	Amarillo	BAL_08
XI-103-002	Rojo	BAL_08
XI-103-003	Verde	BAL_08
XI-103-004	Rojo	BAL_09
XI-103-005	Amarillo	BAL_09
XI-103-006	Verde	BAL_09
XI-103-007	Sirena	BAL_09
XI-103-008	Rojo	BAL_10
XI-103-009	Verde	BAL_10

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Señales de campo balizas área 105 y 106**

Señal de campo	Módulo por utilizar	Número de baliza
XI_104_001	Rojo	BAL_10
XI_104_002	Amarillo	BAL_10
XI_104_003	Sirena	BAL_10
XI_106_002	Rojo	BAL_11
XI_106_003	Rojo	BAL_12

Fuente: elaboración propia

3.1.3. Interfaz Humano Máquina

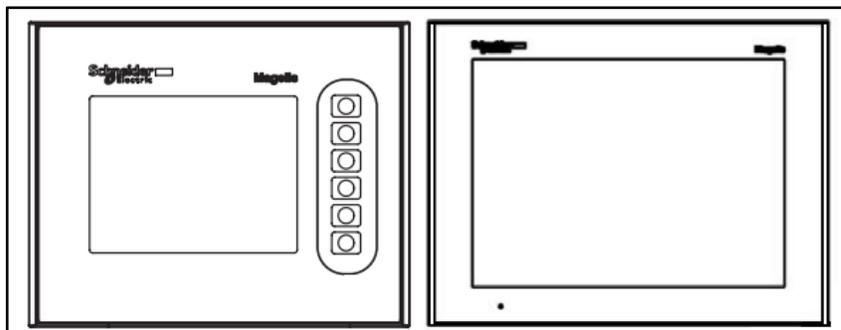
A continuación, se presenta la interfaz humano-maquina.

3.1.3.1. Conceptos fundamentales de HMI

Una interfaz Humano-Máquina es un panel de instrumentos en el que el operario puede coordinar y controlar procesos, en otras palabras, traduce variables de procesos complejos en información útil y procesable.

Una HMI generalmente consiste en un panel con pantalla táctil, en la que se despliega la información en forma gráfica, para que el usuario interprete la información de una forma fácil y rápida; dependiendo del modelo pueden tener conmutadores para programar distintas funciones según se requiera, en otros modelos más avanzados, todas las funciones se configuran en la terminal táctil.

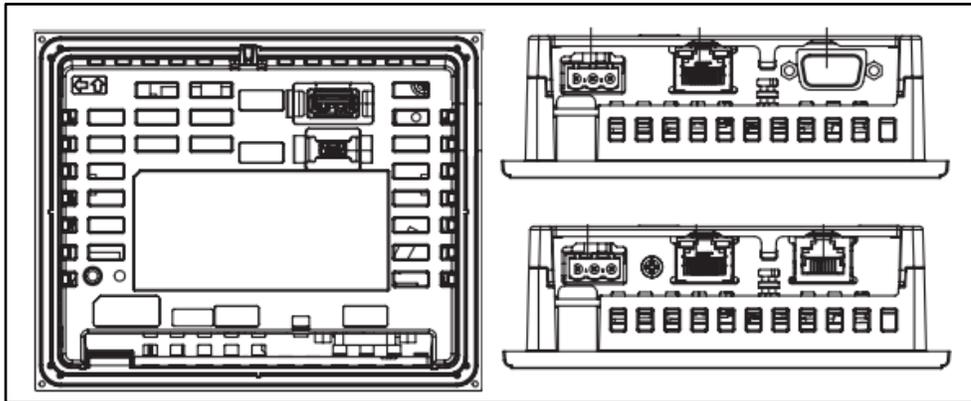
Figura 44. Vista frontal Interfaz Humano Máquina



Fuente: Magelis. *HMI GTO for Vijeo Designer User Manual 2016*.

En la parte posterior e inferior poseen los puertos para interfaz USB, interfaz de comunicación en serie, interfaz ethernet y la conexión para alimentación.

Figura 45. Vista inferior y posterior de HMI



Fuente: Magelis. *HMI GTO for Vijeo Designer User Manual*. p. 32.

En la línea de producción de cartón moldeado, se utilizará para que el operario pueda monitorear y modificar los parámetros de la línea de una forma fácil y sin necesitar capacitación técnica especializada.

Los principales parámetros para tomar en cuenta al momento de elegir una HMI, son los siguientes:

- Voltaje de entrada: Por lo regular pueden ser en 24VCC o 120VAC, esto es importante de considerar ya que puede necesitarse una fuente de poder adicional para su alimentación.
- Tamaño de pantalla: Debe considerarse según la cantidad de datos a mostrar.
- Resistencia al entorno físico: Por lo regular la parte frontal es IP65, mientras que el cuerpo del equipo es IP20. Esto debe considerarse ya

que por lo regular estos equipos se encuentran en planta, pero con el cuerpo resguardado dentro de un panel.

- Capacidad de memoria y almacenamiento: en función de la cantidad de datos que se mostrarán.
- Tipos de transmisión: para conectarla con el PLC y dispositivos externos.

3.1.3.2. Tipos de HMI

En la industria actual, puede encontrarse dos tipos de HMI: terminal operador y PC con Software.

- Terminal operador: Son el tipo de HMI más utilizado actualmente en la industria, el operador puede observar y modificar los parámetros según las restricciones previamente configuradas, estas son de un menor costo, sin embargo, tienen ciertas limitantes en cuanto hardware y software. Su programación y configuración se realiza mediante un software especializado, para Schneider Electric, éste es Vijeo Designer®.
- PC + Software: Estas son básicamente un ordenador con software especializado para el monitoreo de variables, su costo es mucho mayor al de un terminal operador, sin embargo, tiene mayor capacidad de procesamiento, en la industria actual, se suele utilizar un ordenador tipo industrial para evitar problemas de deterioro del hardware por temperatura o suciedad. Al igual que las terminales operador, utilizan un software especializado para su configuración y programación.

- Software de configuración pantallas Magelis: Vijeo Designer se utiliza para crear aplicaciones de diálogo, para que el operador controle sistemas de automatización.

Vijeo Designer y un terminal adecuado pueden combinarse para proporcionar una solución para cada requisito de estación de control, a costa de una simple reconfiguración de software, soporta transmisión de imágenes y de video. Los usuarios pueden ver su proceso instantáneamente o demorarse, en la misma pantalla que el diálogo HMI.

Utiliza la conectividad de Magelis Ethernet TCP / IP y, por lo tanto, es compatible con el acceso remoto WEB Gate, el intercambio de datos de aplicaciones entre terminales, la transferencia de recetas y registros de variables y mucho más, todo con total seguridad.

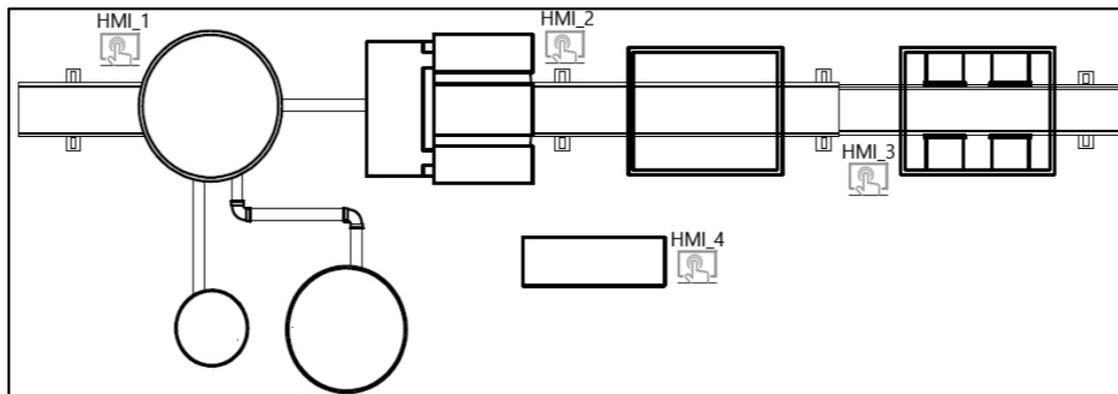
Vijeo Designer es el componente HMI de SoMachine, se ejecutará en cualquier PC con Windows XP Professional o Windows 7. Es compatible con la simulación WYSIWYG de la aplicación expandida (sin el terminal Magelis GT / GK / GTW / GTO o Magelis iPC de destino), la simulación de variables PLC (I / O, bits y palabras internos) y asegúrese de que la aplicación se ejecute con total seguridad en el terminal de terminal Magelis GT / GK / GTW / GTO o en las PC industriales de Magelis.

3.1.3.3. Selección de HMI adecuadas

Según los criterios expuestos en los apartados anteriores, se procederá a elegir las interfaces adecuadas para desplegar los datos.

Se considera 4 pantallas HMI, debido a la cantidad de variables y cercanía entre los procesos.

Figura 46. **Ubicación física de HMI**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Como se mencionó anteriormente, se requiere que las interfaces posean comunicación ethernet para que se comuniquen con el PLC y demás dispositivos de la red, cabe mencionar que el PLC estará ubicado en el gabinete de control ubicado en el mismo panel que HMI_4.

Se recomienda el modelo HMIGTO5310 para las 4 ubicaciones, ya que es un modelo de tamaño adecuado que cumple con las especificaciones mínimas de memoria y comunicación necesarias. Las características del modelo son las siguientes:

Tabla XXVIII. **Características HMIGTO5310**

Especificación	Valor nominal
Voltaje de entrada	24VDC
Dimensiones de pantalla	10.4”
Resolución	640x480 Píxeles
Capacidad de memoria:	96 MB
Tipo de terminal	Pantalla táctil
Software de configuración	Vijeo Designer
Almacenamiento	Tarjeta SD 32GB
Protocolos compatibles	Modbus TCP Modbus Plus Ethernet RJ45 SUB-DB9, RS232 Sub-DB9, RS485

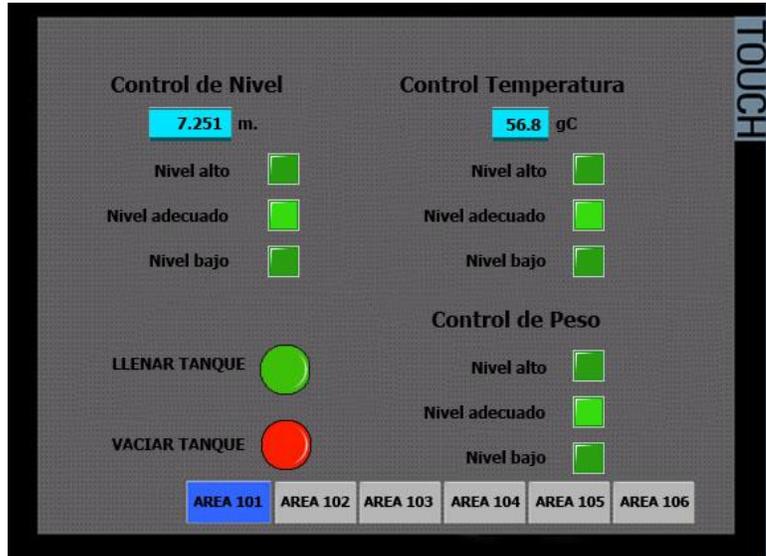
Fuente: Magelis HMIGTO5310 User Manual

Al evaluar las características mostradas en la tabla anterior, se observa que, en efecto, la HMIGTO5310 cumple con los requisitos necesarios para en proyecto.

3.1.3.4. Configuración de HMI

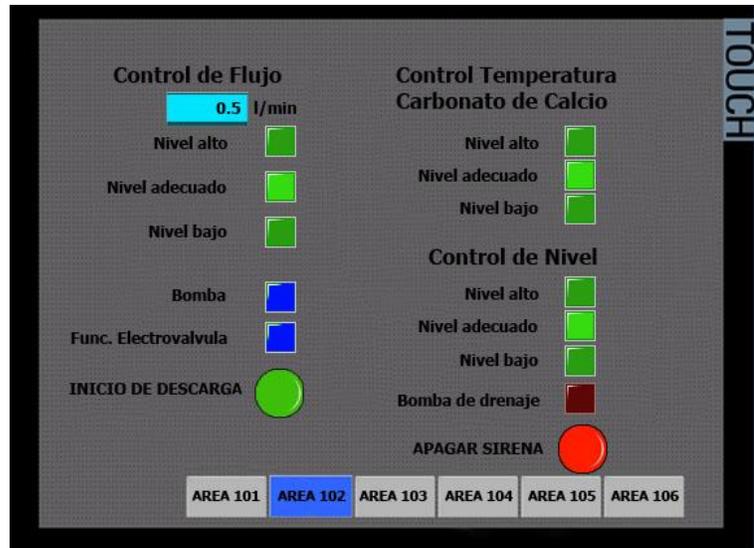
La configuración de la HMI se realizará por medio del software Vijeo Designer Basic versión 1.1. Cabe mencionar que esta versión de software con ciertas limitaciones, sin embargo, es la versión disponible gratuita del mismo.

Figura 47. Visualización parámetros área 101



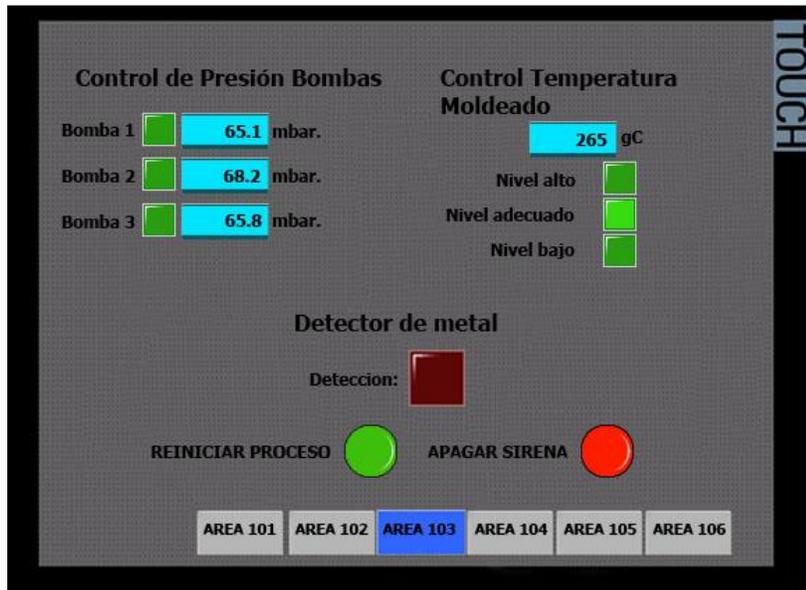
Fuente: elaboración propia, empleando Vijeo Designer Lite.

Figura 48. Visualización parámetros área 102



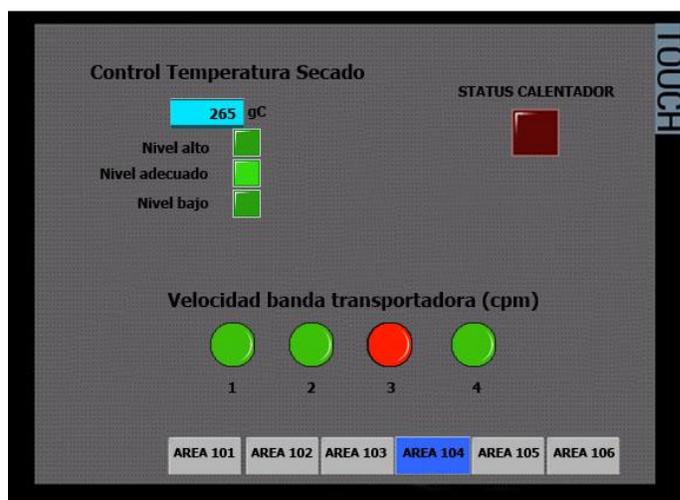
Fuente: elaboración propia, empleando Vijeo Designer Lite.

Figura 49. Visualización parámetros área 103



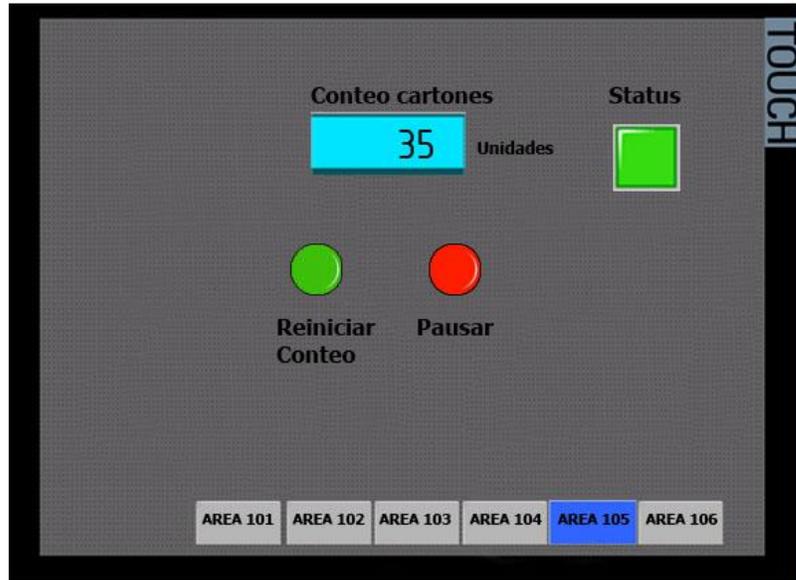
Fuente: elaboración propia, empleando Vijeo Designer Lite.

Figura 50. Visualización parámetros área 104



Fuente: elaboración propia, empleando Vijeo Designer Lite.

Figura 51. Visualización parámetros área 105



Fuente: elaboración propia, empleando Vijeo Designer Lite.

Figura 52. Visualización parámetros área 106



Fuente: elaboración propia, empleando Vijeo Designer Lite.

3.2. Diseño del sistema de monitoreo

A continuación, se presenta el diseño el sistema de monitoreo.

3.2.1. Protocolos de comunicación para redes industriales

Las redes de comunicación en ambientes industriales deben satisfacer ciertos requisitos adicionales a los habituales, como serían los siguientes:

- Deben funcionar en ambientes hostiles (Perturbaciones electromagnéticas, altas temperatura, polvo, suciedad, etc.).
- Gran exactitud y velocidad de procesamiento por parte del hardware de comunicación, ya que la mayoría de las aplicaciones requiere trabajar en tiempo real.
- Fiabilidad y disponibilidad de las redes, redundancia y que los protocolos de comunicación dispongan de mecanismos avanzados para la detección y corrección de errores, debido a que, en su mayoría, transportan datos de gran importancia para la seguridad de la planta.

Existe una gran cantidad de protocolos de la capa de aplicación que se puede utilizar en las redes industriales, sin embargo, se nombra únicamente los principales:

- Modbus TCP
- Ethernet/IP
- Profinet
- EtherCat

- Powerlink

Anteriormente, estos protocolos dependían cada fabricante de hardware, ya que muchos eran exclusivos para una marca en específico. En la actualidad, los dispositivos de distintos fabricantes pueden ser compatibles utilizando módulos pasarela que permiten comunicación entre distintos protocolos o utilizando protocolos estandarizados.

Las redes de control o buses de campo resuelven los problemas de comunicación a niveles inferiores de la pirámide CIM, y se utilizan para comunicar sistemas de control industrial con los dispositivos de campo.

En este caso se utilizará Ethernet IP para comunicar el PLC con las pantallas HMI, ya que es un protocolo muy versátil y escalable, por lo que cualquier ampliación o modificación en la red, se realizará fácilmente, además de ser un protocolo muy utilizado por diversos fabricantes, lo que nos da la facilidad de colocar dispositivos de distintas marcas.

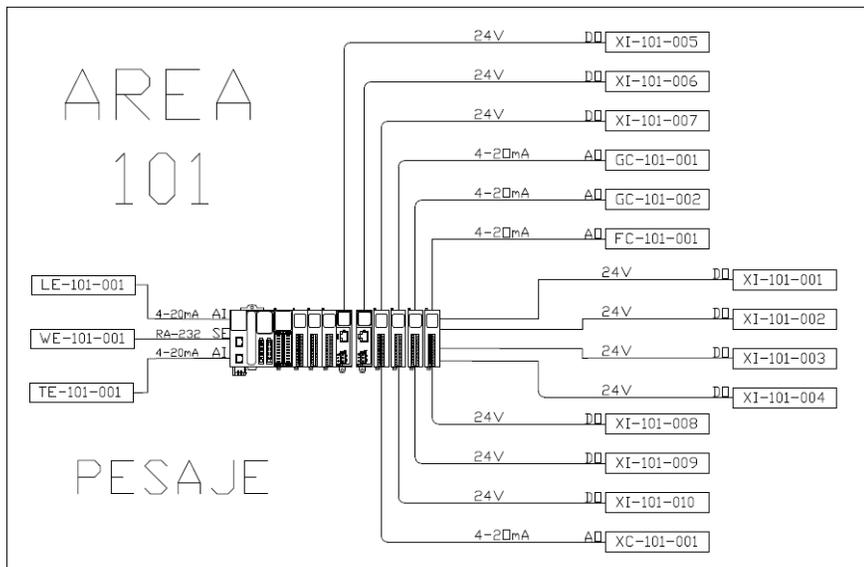
Utilizar Ethernet IP nos dará también la facilidad de comunicar la red con redes anteriormente creadas dentro de la misma empresa, y su mantenimiento requiere menos tiempo y costo con el reemplazo fácil del dispositivo, la resolución rápida de problemas y el diagnóstico de fácil acceso.

No se necesita buses de campo entre los sensores y el PLC, ya que la comunicación se realizará de manera directa. La comunicación entre los dispositivos se realizará utilizando un switch industrial no administrable de 8 puertos RJ45, 10/100Mbps, modelo FL SWITCH SFNB 8TX.

3.2.2. Comunicación entre equipos de la red

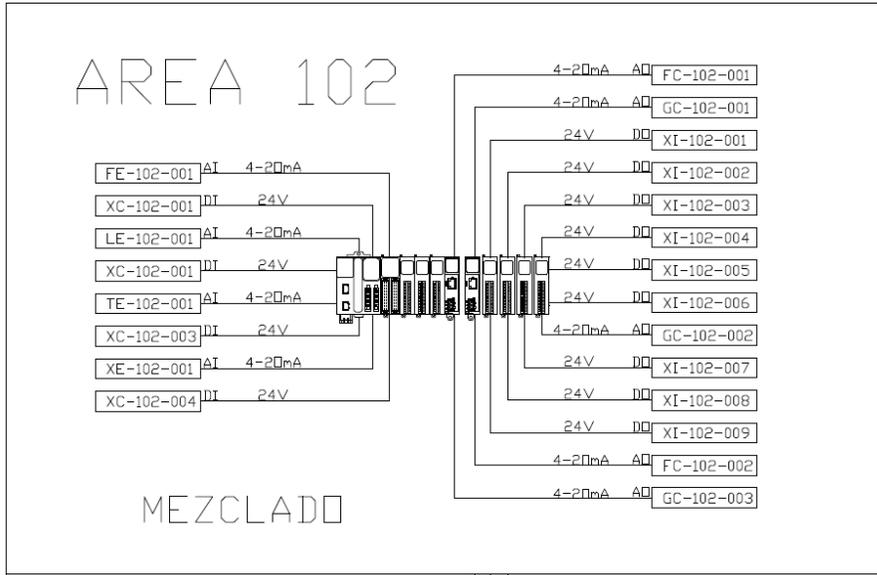
Se mostrará los diagramas de conexión de los dispositivos de la red, considerando el tipo de señal, cabe resaltar que, a manera de simplificación, se mostrará dividido en áreas.

Figura 53. Diagrama de señales en área 101



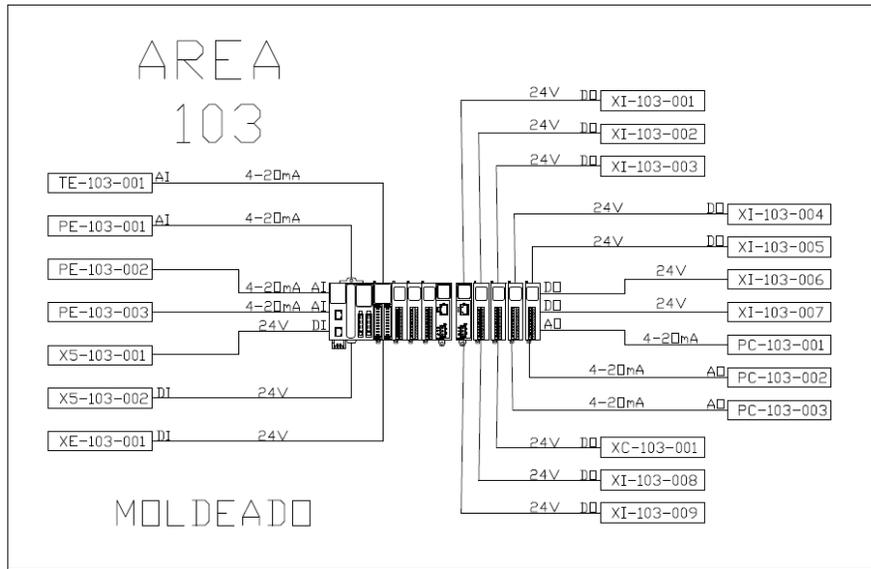
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 54. Diagrama de señales en área 102



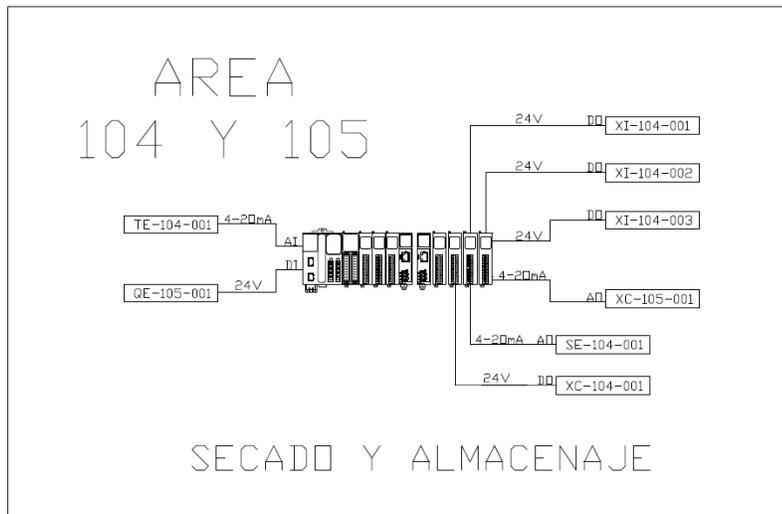
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 55. Diagrama de señales en área 103



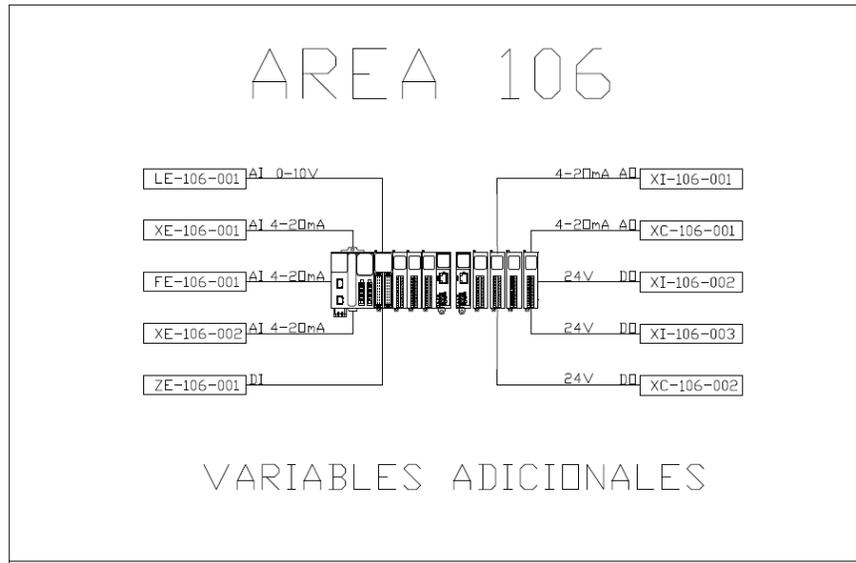
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 56. Diagrama de señales en área 104 Y 105



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 57. Diagrama de señales área 106

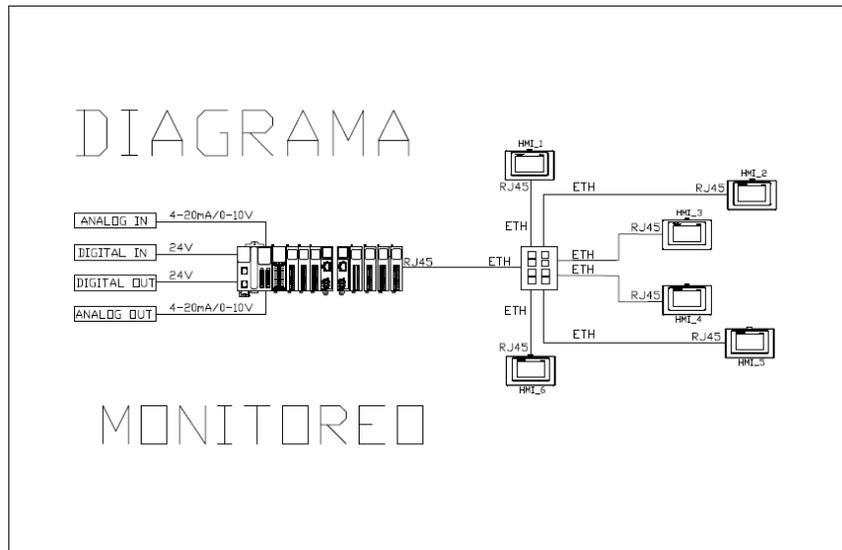


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

3.2.3. Diagramas de topología de red

A continuación, se presenta el diagrama de topología completo del sistema de monitoreo de la línea de producción. La comunicación entre el PLC y las HMI se realizará por medio Ethernet, con cable RJ45 categoría 6A blindado para evitar ruido e interferencia electromagnética en la comunicación.

Figura 58. Diagrama de sistema de monitoreo



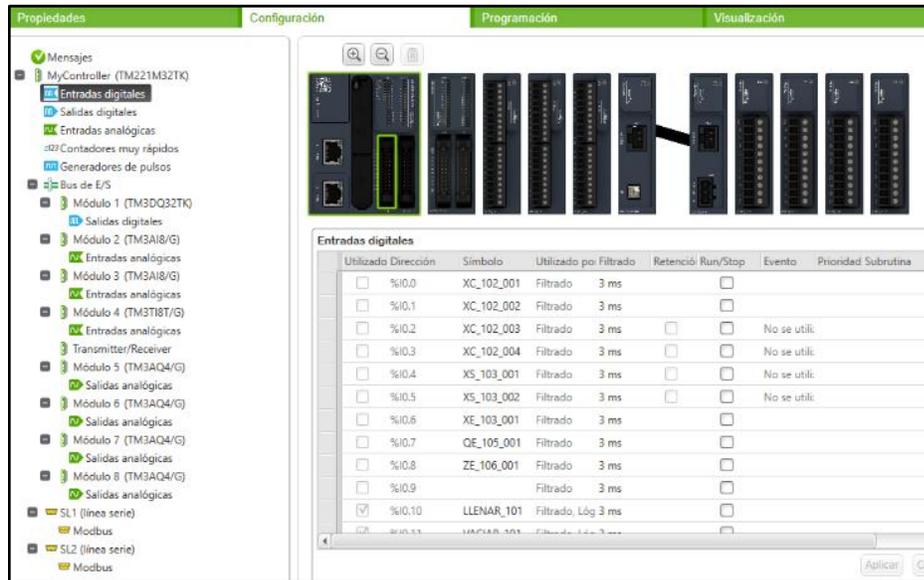
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

3.2.4. Configuración del sistema de monitoreo en la línea de producción

La configuración de las entradas y salidas se realizará utilizando los diagramas de la sección 2.3.2, ya que estos proporcionan la información necesaria respecto al tratamiento de las señales.

En la sección 3.1.1.2, se realizó la selección del PLC y sus módulos acordes al número de entradas y salidas, por lo que, conforme a dicha configuración, se procede a asignar un símbolo a cada dirección de los puertos E/S de los dispositivos.

Figura 59. Configuración de entradas y salidas



Fuente: elaboración propia, empleando So Machine V1.6.

En los módulos digitales únicamente se asigna un símbolo, en este caso será el nombre asignado a cada variable en el capítulo 2.

En los módulos analógicos, se asigna el símbolo de la misma manera que a los módulos digitales y se parametrizan (se asigna tipo de entrada, rango de voltaje o corriente, el rango de valores de la parametrización, entre otros).

Figura 60. Configuración entradas analógicas

Entradas analógicas										
Utilizado	Dirección	Símbolo	Tipo	Ámbito	Mínimo	Máximo	Filtri	Unidad de fi	Muestreo	Unidades Comenta
<input checked="" type="checkbox"/>	%IW2.0	LE_101_001	4 - 20 mA	Normal	0	6000	0	x 10 ms	1 ms/canal	
<input type="checkbox"/>	%IW2.1	LE_102_001	4 - 20 mA	Normal	0	5000	0	x 10 ms	1 ms/canal	
<input type="checkbox"/>	%IW2.2	XE_102_001	4 - 20 mA	Normal	0	100	0	x 10 ms	1 ms/canal	
<input type="checkbox"/>	%IW2.3	FE_102_001	4 - 20 mA	Normal	0	125	0	x 10 ms	1 ms/canal	
<input type="checkbox"/>	%IW2.4	PE_103_001	4 - 20 mA	Normal	0	10	0	x 10 ms	1 ms/canal	
<input type="checkbox"/>	%IW2.5	PE_103_002	4 - 20 mA	Normal	0	10	0	x 10 ms	1 ms/canal	
<input type="checkbox"/>	%IW2.6	PE_103_003	4 - 20 mA	Normal	0	10	0	x 10 ms	1 ms/canal	
<input type="checkbox"/>	%IW2.7	LE_106_001	4 - 20 mA	Normal	0	8000	0	x 10 ms	1 ms/canal	

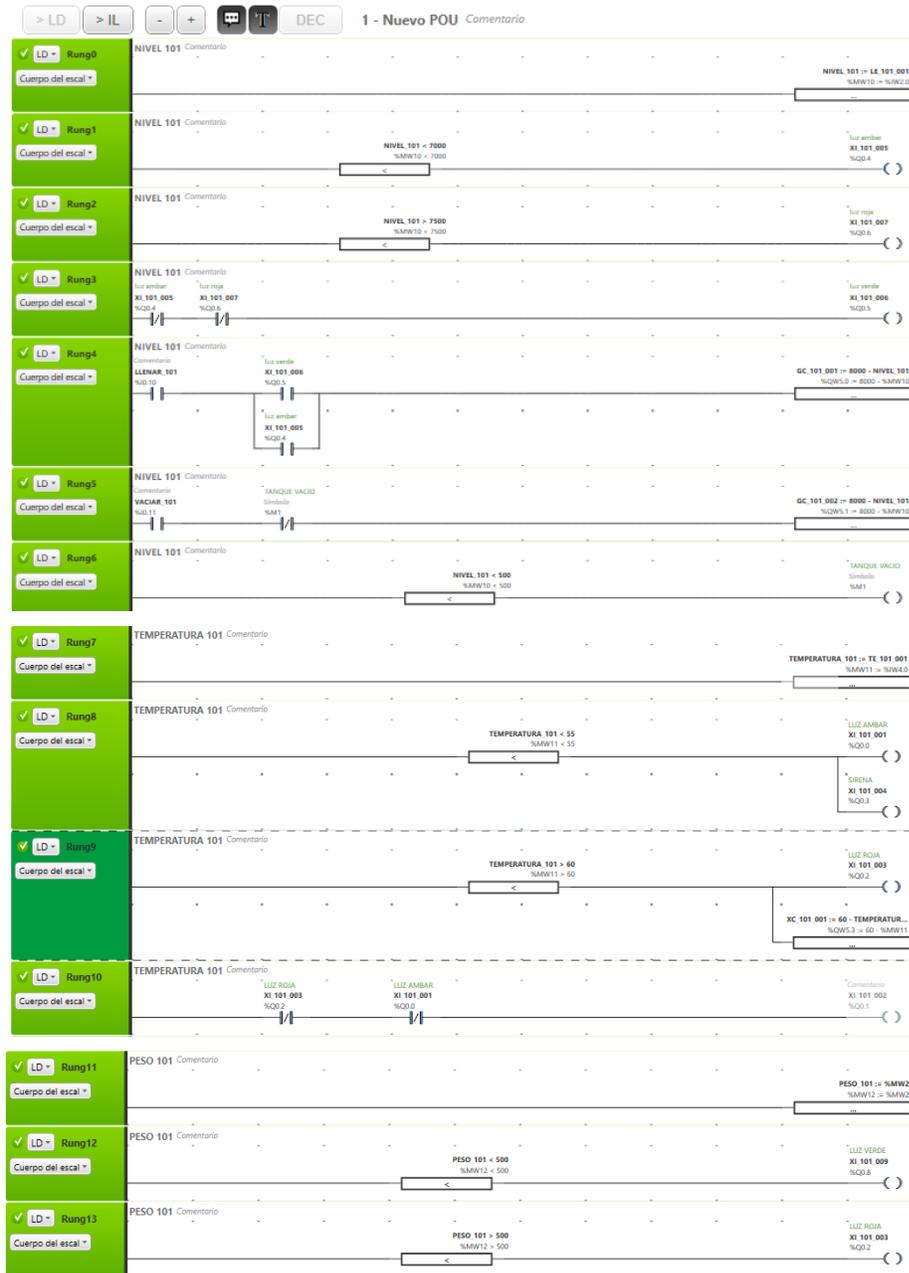
Fuente: elaboración propia, empleando So Machine V1.6.

Las variables de temperatura se parametrizan utilizando una ventana asistente.

Finalizada la parametrización de las entradas y salidas, se realiza la programación utilizando programación en escalera.

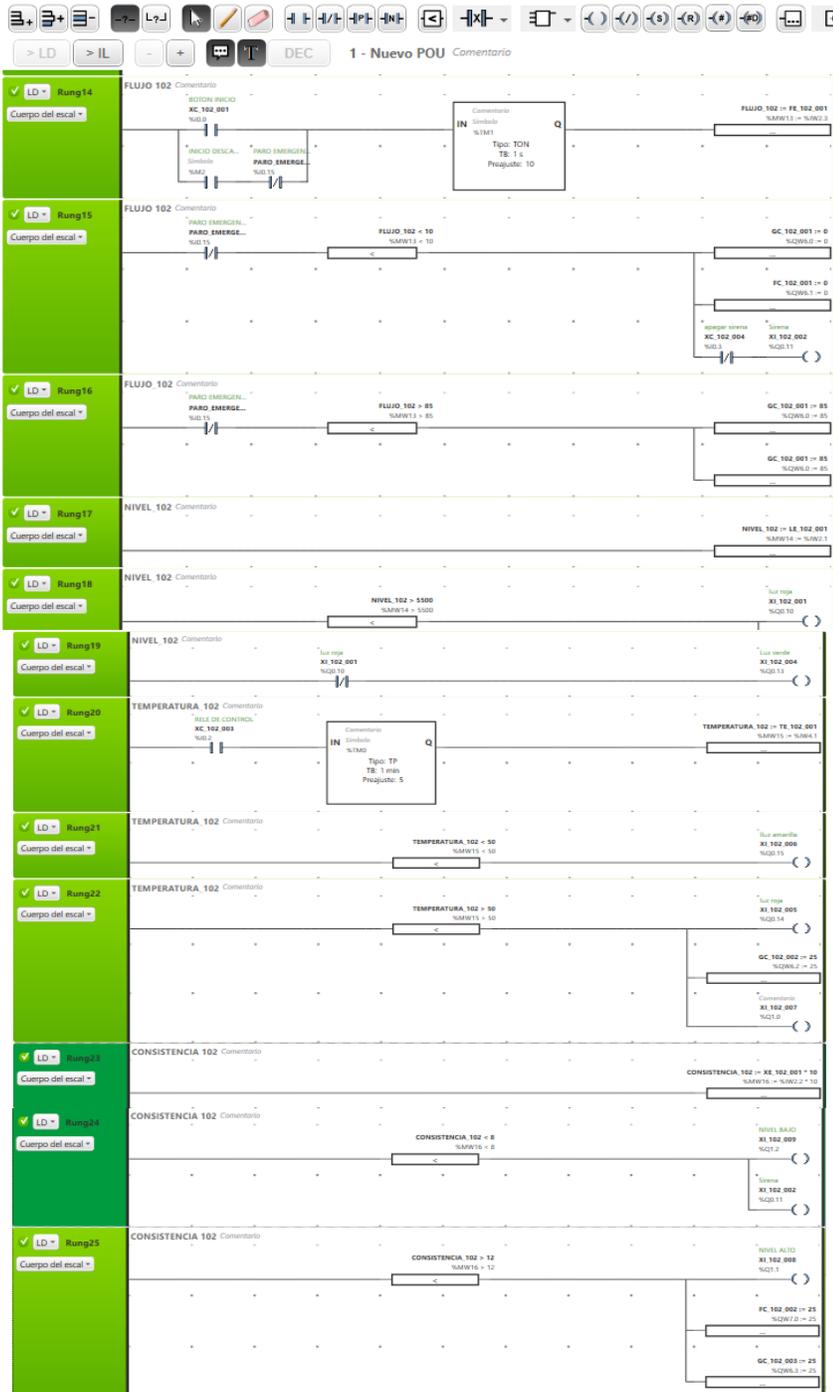
Se utilizará bloques de programación como comparadores, temporizadores y contadores para realizar el control de las variables, así como marcas y espacios en memoria para las operaciones aritméticas.

Figura 61. Programación control área 101



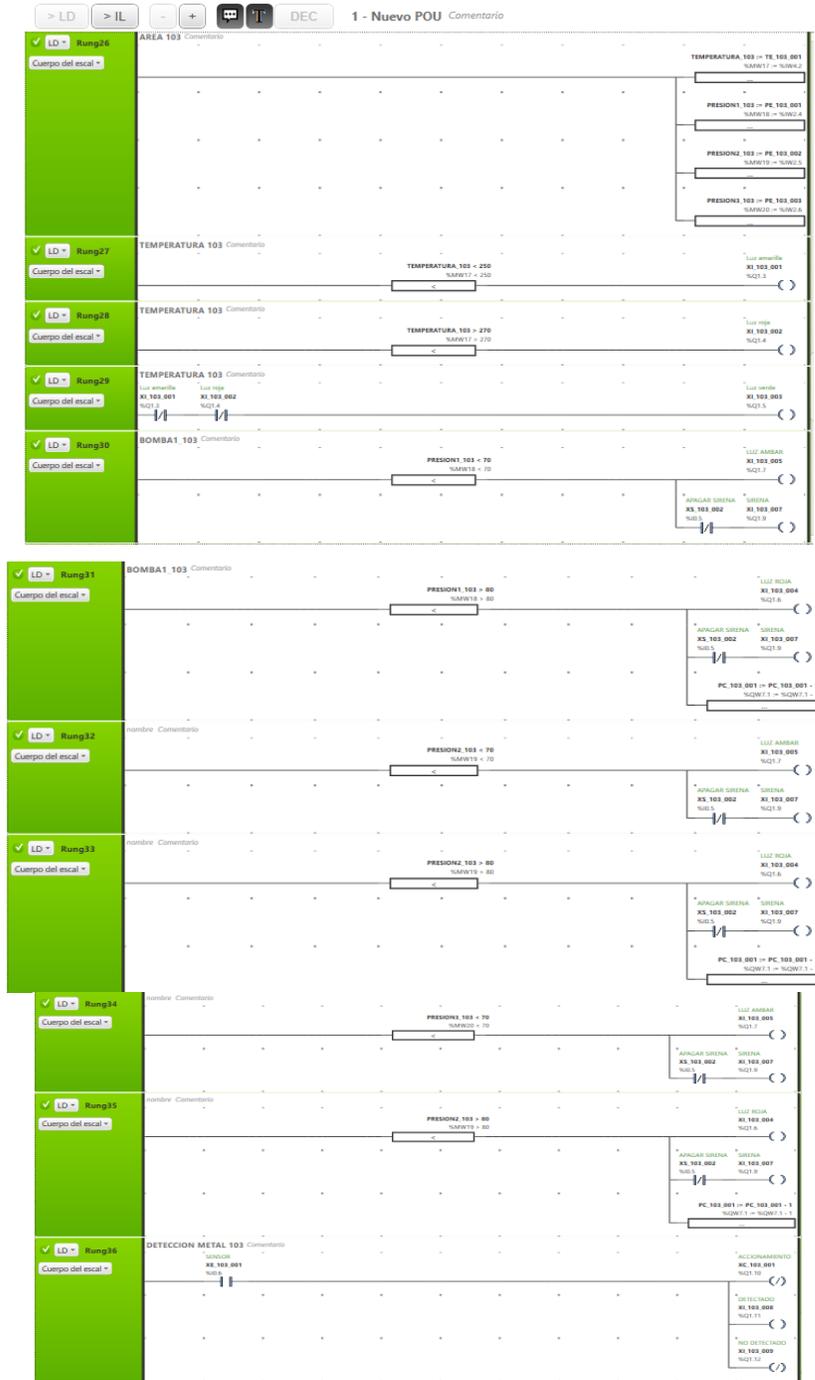
Fuente: elaboración propia, empleando So Machine V1.6.

Figura 62. Programación control área 102



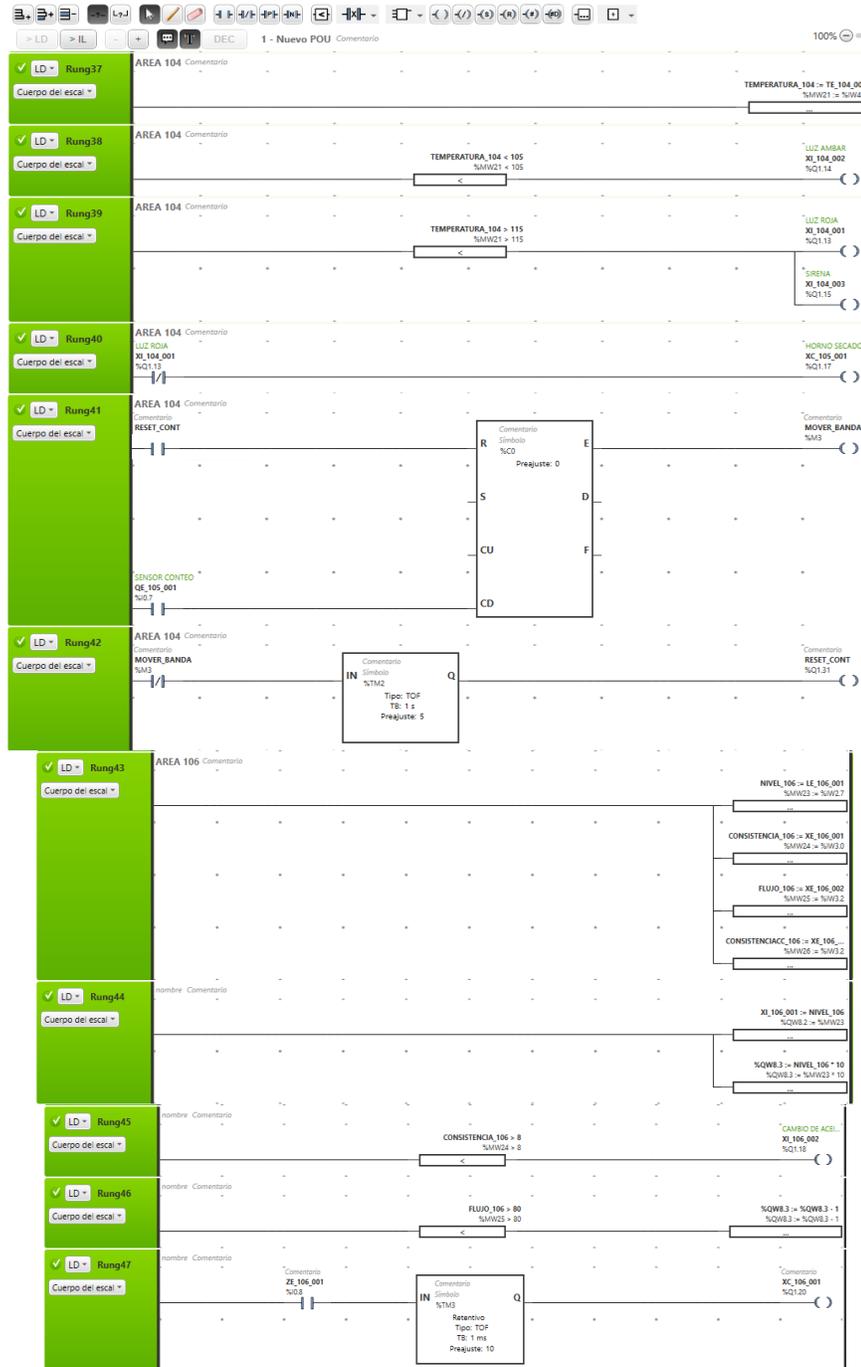
Fuente: elaboración propia, empleando So Machine V1.6.

Figura 63. Programación área 103



Fuente: elaboración propia, empleando So Machine V1.6.

Figura 64. Programación área 104, 105 y 106



Fuente: elaboración propia, empleando So Machine V1.6.

4. PROTECCIÓN DE EQUIPO ELECTRÓNICO DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN

En la presente sección se diseñará el sistema de protección para los equipos electrónicos del sistema de monitoreo, se dará una explicación de estos fenómenos eléctricos y la manera en que estos pueden dañar los dispositivos.

4.1. Fenómenos que afectan la calidad de energía eléctrica

Existe un gran número de fenómenos que afectan la calidad de energía eléctrica, sin embargo, en esta sección se presentará los más recurrentes y perjudiciales para los equipos electrónicos y eléctricos.

4.1.1. Corto circuito y sobre corriente

Los cortocircuitos producen altas corrientes que se manifiestan por el calentamiento excesivo de los conductores que se dilatan y por ende presentaran acercamientos con tierra y con otras fases, o bien se puede denominar corto circuito una condición anormal en el sistema que se presenta un mínimo de veces, y sus efectos pueden ser tales que lleguen producir daños severos a equipos, en sí es una condición anormal a la que sistemas eléctricos de potencia suele estar expuesto durante su operación. Cuando este ocurre, la protección primaria y la de respaldo sacaran de operación la zona fallada.

El origen de este puede originarse por:

- Falla entre fases: Son cortocircuitos producidos por mala operación, arcos ocasionados por ionización del aire.
- Falla a tierra: Son ocasionados por animales, mala operación, arcos, deterioro de aisladores, desprendimiento del conductor a tierra o sobre estructura, etc.

Es de conocimiento general que los sistemas se encuentran diseñados para soportar cierta sobrecarga. Durante la operación se relaciona con el enfriamiento y la duración que tenga, de manera que cuando se diseñe la protección, debe diseñarse de tal forma que debe permitir sobrecargas de los límites permisibles por cada equipo, los cuales suelen darse por el tipo de aislamiento.

Las sobrecargas suelen conllevar a calentamiento de los conductores cuando estas son sostenidas, por lo que pueden dañar el aislamiento en el equipo asociado a una subestación, si este deterioro es severo y progresivo puede producir un arco eléctrico que puede provocar un incendio.

Son producidas en sí, por altas transferencias de energía que proporcionan aumentos considerables de corriente y que producen efectos destructivos. Por lo que es necesario que las fallas que suelen originar un cortocircuito sean despejadas, aclaradas y asiladas rápidamente por interruptores involucrados en las fallas.

Su principio de operación se basa en el parámetro de la corriente de falla, se emplean diversos tipos de relevadores, los cuales utilizan principios fundamentales: atracción electromagnética, inducción magnética y con elementos en estado sólido. El objetivo principal de la protección es llegar a

detectar la falla y dar orden al interruptor para que la aíse, de segundo con la selectividad y velocidad que se despeje de la falla se puede conseguir menor grado en base a una adecuada coordinación de los relevadores de sobre corriente.

4.1.2. Fluctuaciones en la tensión

Este problema suele ser un problema de calidad de energía, se refieren en sí a un conjunto de condiciones que producen resultados indeseables para el equipo eléctrico instalado en la industria, por ejemplo, y en el sistema eléctrico de potencia que suministra la energía. Estas variaciones son cambios en la tensión de la red eléctrica. Por lo que las fluctuaciones de tensión son serie de variaciones de tensión cíclicas.

Generalmente, todos los equipos operan a tensión nominal, y cuando tienen una tensión de cero en terminales simplemente no operan, esto es, cuando no cuentan con una batería de emergencia. Sin embargo, entre estas dos condiciones extremas se encuentran las depresiones en la magnitud de la tensión eléctrica de corta o de larga duración, y el bajo nivel de tensión. Por lo que, es conveniente definir estos términos. Usualmente, las depresiones en la tensión eléctrica son asociadas a fallas en el sistema eléctrico de potencia, pero también es asociado a cambios repentinos de grandes bloques de carga o el arranque de motores de gran capacidad.

En relación con la elevación de la tensión, no suele ser producida por un transitorio de maniobra de interruptores o descargas atmosféricas, si no que se debe a factores como: condiciones de baja carga en la red, desconexión de líneas, rechazos de carga y efectos de excitación en generadores.

4.1.3. Transitorios

Si el circuito posee elementos almacenadores de energía como los condensadores o inductancias, es posible que durante un cierto tiempo las magnitudes eléctricas de dicho circuito varíen de una forma muy acusada hasta estabilizarse o encontrar equilibrio en valores que luego se mantendrán durante el resto del tiempo, durante este intervalo de tiempo que toma para alcanzar estabilización o equilibrio es el régimen transitorio.

Los fenómenos transitorios constituyen en un gran porcentaje de los regímenes de operación de cualquier red eléctrica. La simple conexión o desconexión de los equipos, variación de las magnitudes de alimentación de una red o de los parámetros que caracterizan sus componentes; además de las fallas producidas, ya sea por factores tecnológicos o por medioambientales, provocan condiciones anormales en las redes eléctricas con el consiguiente estrés en los equipos: calentamiento, vibraciones, etc., lo que puede provocar averías y disminuir el tiempo de vida útil de los mismos.

El estudio de los procesos transitorios permite predecir qué tanto y por qué tiempo, puede soportar una red los efectos de estos fenómenos; además, suministran datos útiles para el diseño de equipos que actúan como protección.

4.1.4. Armónicos

Esta distorsión en la onda de tensión se traduce en una variación de sus valores de frecuencia y amplitud nominal y en forma de onda diferente a la sinusoidal. El origen de estos se encuentra en la presencia de cargas no lineales en el sistema eléctrico; las cargas no lineales consumen una corriente no sinusoidal, aunque la tensión de alimentación sea sinusoidal. Esta

circulación de corriente no sinusoidales provoca la distorsión de las tensiones de los diferentes puntos de la red, ya que las caídas de tensión no son sinusoidales.

La presencia de armónicos en la red se traduce en un mal funcionamiento de receptores sensibles a la pérdida de calidad de onda de la tensión, sobrecargas, aumento de las pérdidas, entre otros. Entre los efectos se pueden encontrar:

- En los conductores: las intensidades armónicas conducen a un aumento del valor eficaz de la corriente en los conductores, lo que llega a ocasionar actuaciones intempestivas de las protecciones. Por otro lado, a medida que aumenta la frecuencia de los armónicos, el efecto skin y el efecto pelicular se hacen más notorios, lo que reduce la sección efectiva del conductor.
- En el conductor de neutro: aquellas cargas trifásicas y existencia de conductor de neutro, si las intensidades que consumen dichas cargas genera armónicos de orden múltiplo de tres, circulan por el conductor puesto que la suma no es cero, y llega a producir calentamiento y posible destrucción si no se ha dimensionado correctamente teniendo en cuenta la naturaleza de las cargas conectas; además pueden aparecer ruidos de frecuencia audible en cables instalados debido a las vibraciones y valores de tensión entre neutro y tierra grandes.
- En los transformadores: debido al aumento del valor eficaz de la intensidad, se produce un aumento de pérdidas por efecto Joule en los devanados; además aumentan las pérdidas de hierro. Las pérdidas debidas a las corrientes de Foucault son proporcionales al cuadrado de

la frecuencia, lo que conduce a una disminución en la potencia máxima que puede suministrar un transformador si existen armónicos en la red.

- En los transformadores triángulo-estrella: si hay intensidades de frecuencia múltiplo de tres, al estar en fase no llegan circular por las fases que alimentan al primario, por lo que quedan circulando en los devanados, si no se toma en cuenta ello puede producir sobrecalentamiento en los devanados del primario que no sean detectados por las protecciones del sistema.
- En los motores: la presencia de armónicos pueden generar vibraciones anormales debido a los pares motores adicionales que provocan, redundando en un acortamiento de la vida útil del motor.
- En los condensadores: la presencia de condensadores junto con reactancias inductivas de la red pueden provocar que aparezcan resonancias que amplifican los armónicos ya existentes, por lo que pueden conllevar a un sobrecalentamiento y eventual destrucción de dicho condensador; además se debe tomar en cuenta que la impedancia de un condensador disminuye con la frecuencia lo que conlleva a los mismos resultados.
- En equipos electrónicos: aquellos que funciones en base a la frecuencia de la red, pueden llegar a tener problemas debido a la distorsión de la onda, dependiendo en sí de los pasos por cero de la tensión.
- En medidas eléctricas: los aparatos cuyo funcionamiento es en base al valor medio rectificado o valor de pico, realiza la corrección de la escala para obtener un valor eficaz de la magnitud medida, suponiendo de que

presenta esta magnitud una forma de onda sinusoidal, si este no es sinusoidal se produce errores en las medidas realizadas.

- En los contadores: según el tipo de contador el espectro armónico de la carga no lineal se pueden tener lecturas inferiores o superiores a la correcta.

4.1.5. Desbalances y variación de frecuencia

Suele ser permisible dentro de ciertos límites, pero valores fuera de dichos límites son indicativos de un desequilibrio entre la generación y la carga, y por ende condiciones anormales de operación. Entre la protección contra la variación de frecuencia.

La frecuencia de la onda de tensión debe permanecer dentro de unos límites estrictos para que el suministro eléctrico se realice en condiciones de calidad aceptables. La variación de la frecuencia que se alejen del valor nominal, puede llegar a causar mal funcionamiento de diversos equipos industriales, por ejemplo motores pueden verse forzados a girar a velocidades distintas a las cuales fueron diseñados.

4.1.6. Factor de potencia

Es un término utilizado para describir la cantidad de energía eléctrica que se ha convertido en trabajo, se define en sí como el cociente de la relación de potencia activa entre la potencia aparente y es un indicador del correcto aprovechamiento de la energía eléctrica.

Por ejemplo, si este es 0.95, llega a indicar que del total de la energía abastecida sólo el 95 % de la energía es utilizada mientras que el restante es desaprovechado.

Las empresas proveedoras del servicio de energía eléctrica suelen penalizar a los usuarios que tengan un factor de potencia menor a 0.9, por lo que muchos optan por utilizar bancos de capacitores para disminuir este efecto.

4.2. Dispositivos de protección

Se debe considerar que previo a la instalación de cualquier dispositivo de protección, la planta debe contar con un sistema de puesta a tierra funcional, ya que la mayoría de los dispositivos que se utiliza para la protección de los componentes electrónicos, desvían hacia éste los excesos de corriente; También es un requisito indispensable para garantizar la seguridad de las personas que laboran dentro de la planta, ya que todas las partes metálicas accesibles al personal se deben mantener siempre al potencial de la tierra, que es igual a cero.

Es importante aclarar que, aunque esta sección esté dedicada a los equipos de protección para los dispositivos del sistema de monitoreo, la función principal de los equipos es proteger la vida del personal humano.

Un sistema de puesta a tierra consiste literalmente en la conexión hacia la tierra, en el cual se descargarán eventuales excesos de corriente, según IEEE, su definición es la siguiente: «Tierra (sistema de tierra). Una conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por medio de la cual un circuito eléctrico o equipo se conecta a la tierra o a algún cuerpo conductor de dimensión relativamente grande que cumple la función de la tierra». Las

principales razones para colocar un sistema de puesta a tierra son las siguientes:

- Proporcionar una impedancia suficientemente baja para facilitar la operación satisfactoria de las protecciones en condiciones de falla.
- Asegurar que seres vivos no queden expuestos a potenciales inseguros, en régimen permanente o en condiciones de falla.
- Mantener los voltajes del sistema dentro de límites razonables bajo condiciones de falla (tales como descarga atmosférica, ondas de maniobra o contacto inadvertido con sistemas de voltaje mayor), y asegurar que no se excedan los voltajes de ruptura dieléctrica del aislamiento.
- Es una forma de monitorear el aislamiento del sistema de suministro de potencia. Para eliminar fallas a tierra con arco eléctrico persistente.
- Proporcionar una trayectoria alternativa para las corrientes inducidas y de tal modo minimizar el «ruido» eléctrico en cables.
- Proporcionar una plataforma equipotencial sobre la cual pueda operar equipo electrónico.

Cuando ocurre una falla a tierra y la corriente fluye al terreno vía el electrodo de tierra, el potencial del electrodo y de cualquier equipo conectado a él, se elevará sobre el potencial real de tierra. El potencial alcanzado bajo condiciones de falla severa puede ser varios miles de voltios. Como la corriente de falla a tierra fluye en el terreno que rodea al electrodo, el potencial en el

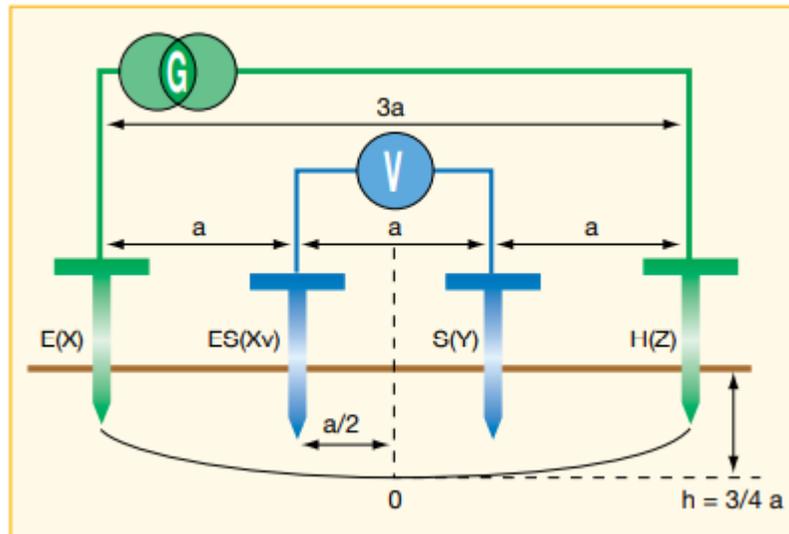
suelo y en su superficie se elevará. Desplazándose lejos del sistema de electrodos, hacia un punto remoto, el potencial se reducirá progresivamente, hasta eventualmente llegar al potencial real de la tierra.

Uno de los requisitos más importantes para asegurar un buen sistema de puesta a tierra, es la resistividad del terreno en que se instalará, ésta se expresa en unidades ohm-metro. Dos de los factores principales que influyen en el valor de resistividad de suelo son la porosidad del material y el contenido de agua. Porosidad es un término que describe el tamaño y número de huecos dentro del material, lo cual está relacionado con su tamaño de partícula y diámetro del poro. Varía entre 80 o 90 % en el sedimento de lagos, hasta 30 % en el caso de arena y arcilla no consolidada y menos en piedra caliza.

Es muy poco frecuente encontrar un terreno ideal para propósitos de puesta a tierra, siempre debe verificarse la resistividad del terreno lo más precisa posible, ya que es directamente proporcional al valor de resistencia a tierra del electrodo, por lo que, si se utiliza un valor incorrecto en la etapa de diseño, la impedancia del sistema puede resultar significativamente mayor a lo planeado, provocando mal funcionamiento, lo que deriva en pérdidas financieras.

Existen distintos métodos para medir la resistividad, el más utilizado es el método Wenner, apropiado en caso de querer realizar la medida en una única profundidad; Para realizar dicha medida se utiliza un ohmiómetro de cuatro terminales, se inserta los cuatro electrodos a una profundidad $3/4a$ en línea recta en el suelo y a igual distancia a entre ellos, como se muestra en la figura:

Figura 65. **Método de Wenner para la medición de resistividad de la tierra**



Fuente: Chauvin Arnoux Group. *Guía de la medición de tierra.*

Se inyecta una corriente de medida I mediante un generador entre los dos electrodos exteriores (E y H), y se mide el potencial V entre los electrodos centrales S y ES; posteriormente se mide en el ohmímetro la resistencia R y se determina la resistividad " ρ " utilizando la ecuación:

$$\rho = 2\pi aR$$

Se recomienda utilizar como mínimo $a=4\text{m}$. En caso la resistividad de la tierra no sea la adecuada, existe distintos tratamientos del suelo para llegar al valor deseado, siendo uno de los más utilizados y efectivos la bentonita. El sistema de puesta a tierra debe dimensionarse considerando que este también

debe conducir la corriente producida por una descarga electro atmosférica, ya que debe llevar conectado un sistema de pararrayos.

Un impacto de rayo en la instalación causaría destrozos, y pondría en peligro los equipos eléctricos instalados conectados a la red de alimentación y la integridad de las personas que laboran en ella, ya que puede producir descargas mayores a 10kA, genera peligrosas sobre tensiones, y toda esta energía se disipa en 100-300 microsegundos y la corriente de pico es alcanzada en 1-2 microsegundos.

El sistema de pararrayos básicamente consiste en un elemento de atracción y medios de transporte para conducirlos hacia colectores de tierra, con el fin de asegurar su disipación en el suelo.

Se utilizará una punta simple de Faraday de cobre cromado como elemento de atracción, ésta se coloca a la intemperie y usualmente en el punto más alto de la instalación, a manera que la probabilidad que atraiga el rayo sea lo más alta posible; posteriormente se instalarán bajantes de pararrayos, dependiendo de la altura del edificio; estos bajantes a su vez se conectarán al sistema de puesta a tierra mediante soldadura exotérmica.

Es importante tomar en cuenta que el nivel isocerámico del lugar donde se encuentra ubicada la planta juega un papel muy importante para determinar el número de puntas a colocar en el sitio, sin embargo, se asumirá únicamente una ya que este estudio queda fuera de los límites del diseño.

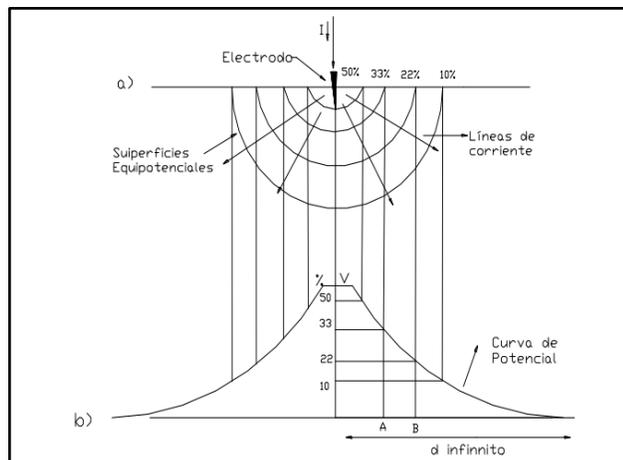
Se ha demostrado que instalaciones con resistencias de tierras inferiores a 5 ohmios representan la menor incidencia de efectos por caídas de rayos, en

este caso en particular, que debe protegerse equipo electrónico, la resistencia del sistema debe ser menor a 4 ohmios.

Los electrodos forman parte importante en el diseño del sistema, ya que son los elementos que están en contacto directo con el terreno. Estos deben ser fabricados con materiales de alta conductividad y durabilidad, también debe ofrecer una baja impedancia y no contaminar el medio ambiente, los principales materiales utilizados para fabricarlos son el cobre y el acero inoxidable.

Si se inyecta una corriente en terreno homogéneo a través de un electrodo, las líneas de corriente se esparcirán en forma radial en todas las direcciones, si se mide la caída de tensión entre el electrodo de tierra y puntos determinados alrededor de él, se determina que las superficies equipotenciales son semiesféricas concéntricas.

Figura 66. **Reparto de corriente y potenciales**

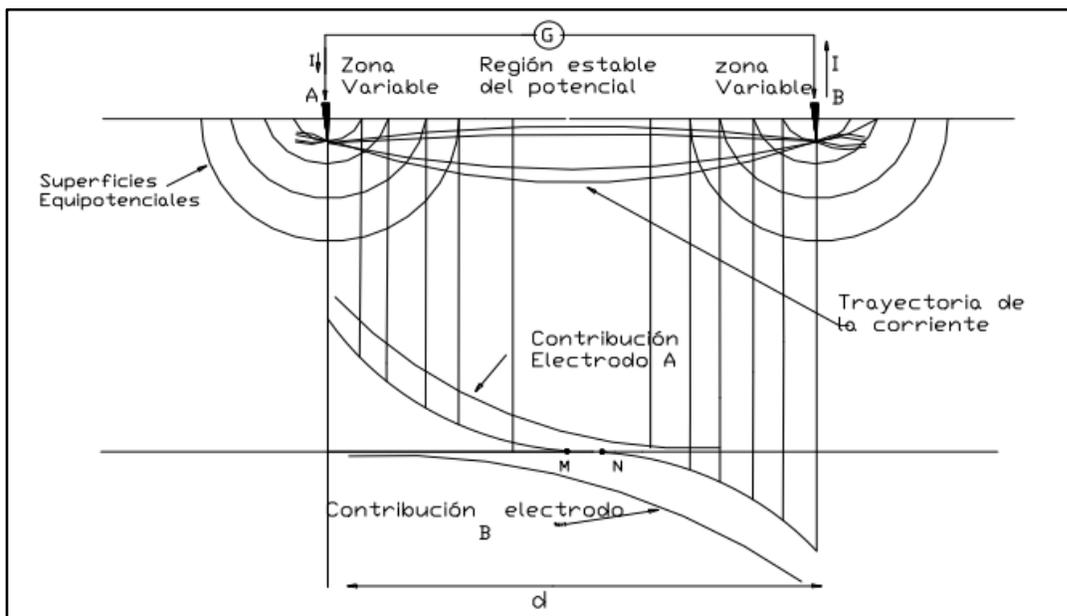


Fuente: TASIPANTA, C. *Estudio e implementación de sistemas de protección contra descargas atmosféricas y puesta a tierra de protección de la compañía "Helmerich and Payne del rig 132"*.

p. 49.

Según se observa en la figura anterior, la caída de tensión entre dos puntos A y B es mayor en la zona próxima al electrodo y disminuye a medida que se aleja.

Figura 67. **Reparto de potencial entre dos puntos**



Fuente: TASIPANTA, C. *Estudio e implementación de sistemas de protección contra descargas atmosféricas y puesta a tierra de protección de la compañía "Helmerich and Payne del rig 132"*.

p. 59.

La distancia entre las superficies debe ser tal, que a medida que se aleja de un electrodo hacia el otro, las variaciones de tensión sean menores, habiendo una región entre estas donde el potencial es casi constante, localizado aproximadamente a la mitad de la distancia d .

Por lo tanto, la distancia A B debe ser lo suficientemente grande con respecto a las dimensiones de los electrodos, de modo que exista una zona de tierra de referencia.

Pueden tener diversas formas según sea requerido, siendo los principales los siguientes:

- El electrodo de varilla ofrece una gran facilidad de instalación y bajo costo, sin embargo, es bastante propenso a la oxidación y corrosión debido a su longitud que puede alcanzar capas húmedas, además tiene poca área de contacto.
- El electrodo de rehilete es adecuado para terrenos difíciles de excavar y consiste en una varilla y dos placas interconectadas entre sí, tienen mayor superficie de contacto y son menos profundas.
- Los múltiples electrodos se conectan en paralelo para disminuir la resistencia de puesta a tierra y los gradientes de potencial, idealmente la mejor solución sería colocar una barra de cobre sólida, sin embargo, esta opción es poco práctica debido a los altos costos, por lo que mientras más electrodos se conecten en paralelo, el sistema será más eficiente.
- Los electrodos de malla están formados por el cruce de varios conductores de cable desnudos enterrados horizontalmente a una profundidad de 0.4 a 1 metros para prever distintas trayectorias de paso de corriente, evitando así grandes caídas de potencial. De igual forma pueden agregarse varillas adicionales para disminuir la resistencia del sistema tanto como sea posible.

Tomando en cuenta los aspectos anteriores, se considerará colocar electrodos de malla; a continuación, se procederá a indicar los parámetros propios de un sistema de puesta a tierra, de igual forma se describirá distintos parámetros propios de un sistema de puesta a tierra.

Tensión de paso es la diferencia de potencial entre dos puntos de un terreno que pueden ser tocados en simultáneo por una persona:

$$E_p = \frac{\rho + 165}{\sqrt{t}}$$

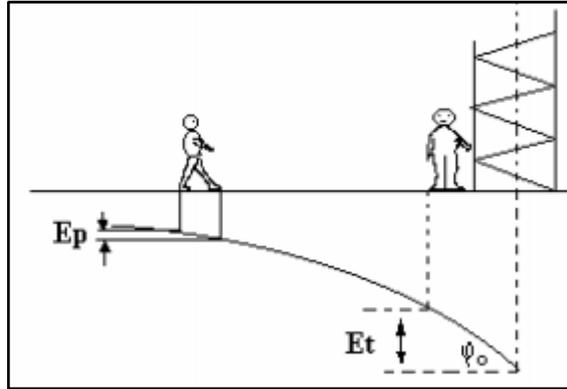
Donde: t es la duración máxima de falla en segundos, ρ es la resistividad de la superficie del terreno en ohmio-metro y E_p es la tensión de paso permisible en voltios.

Tensión de contacto es la diferencia de potencial entre un punto en la superficie del terreno y cualquier otro punto que pueda ser tocado simultáneamente por una persona.

$$E_t = \frac{0.25\rho + 165}{\sqrt{t}}$$

Donde: t es la duración máxima de falla en segundos, ρ es la resistividad de la superficie del terreno en ohmio-metro y E_t es la tensión de contacto en voltios. En la figura 68 se puede observar la diferencia entre tensión de contacto y de paso:

Figura 68. **tensión de paso y de contacto**



Fuente: HERRERA, J., HERNÁNDEZ O., *Cálculo de malla de puesta a tierra de una subestación*. p. 67.

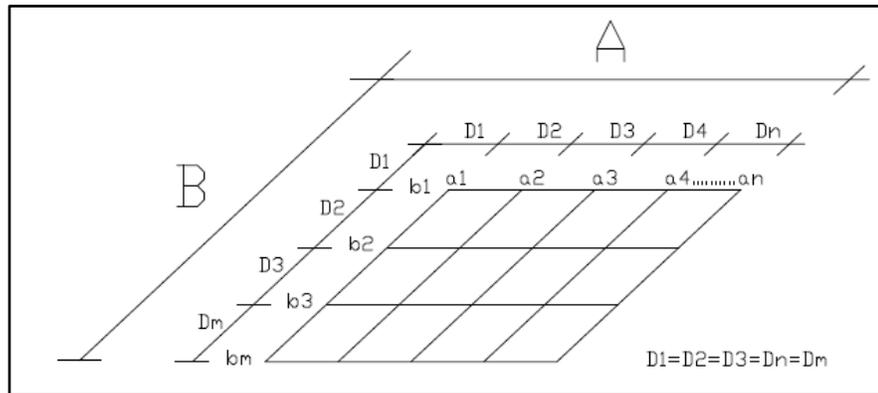
El conductor de la malla también es un aspecto importante para calcular en un sistema de puesta a tierra, se calcula con la siguiente ecuación:

$$Ac = I \sqrt{\frac{33t}{\log\left(\frac{Tm - Ta}{234 + Ta}\right)}}$$

Donde: Tm es la temperatura máxima en los nodos de la malla (450°C para soldadura exotérmica) y Ta es la temperatura ambiente

Es importante destacar que la conexión mínima recomendable es 2/0 AWG para la malla y 5/8" para las varillas de acuerdo con el NEC.

Figura 69. **Especificaciones del sistema de puesta a tierra**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

En la figura anterior, se pueden visualizar las especificaciones principales de un sistema de puesta a tierra; a continuación, se describirá cada uno de los parámetros:

- A: longitud total de la malla (m).
- B: ancho total de la malla (m).
- n: número de conductores en paralelo de longitud A.
- m: número de conductores en paralelo de longitud B.
- L: longitud total del conductor = $nA + mB$ (m).
- D: espaciamiento entre conductores (m).
- h: profundidad de enterramiento (m).
- d: diámetro del conductor (m).

Todas las conexiones se deben realizar con soldadura exotérmica, para el bounding debe utilizarse cable calibre 2 AWG desnudo, anclado a la pared y utilizando los ductos dedicados ya existentes.

La resistencia total de la puesta a tierra se calculará utilizando el método de Laurent:

$$R = 0.443\rho\left(\frac{1}{\sqrt{A * B}} + \frac{1}{L}\right)$$

4.2.1. Descripción de los dispositivos de protección

A continuación, se describe los equipos que se utilizarán para la protección de los dispositivos electrónicos en la línea de producción, en base a los fenómenos indicados en la sección 4.1.

4.2.1.1. Interruptores termomagnéticos

El interruptor termomagnético es un dispositivo empleado para la protección de equipos eléctricos contra cortocircuito y sobre corriente.

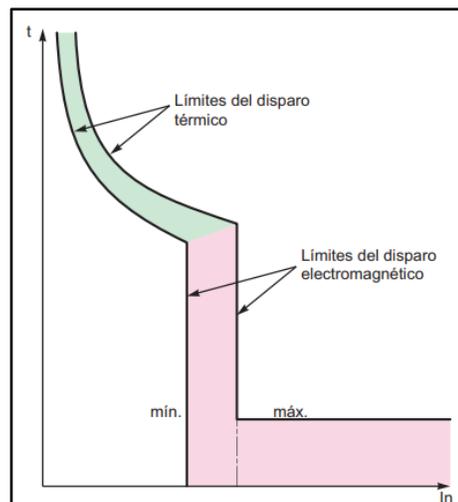
Su funcionamiento contra sobre corriente, consiste en una lámina bimetalica que, al conducir mayor corriente de su capacidad nominal, produce calentamiento, éste a su vez, produce una deformación en la lámina que provoca la apertura del contacto.

Su funcionamiento contra cortocircuito consiste en un electroimán que abre el contacto cuando la intensidad supera al menos 20 veces la intensidad nominal, cabe destacar que este accionamiento sucede mucho más rápido que la protección contra sobre corriente, ya que no depende de calentamiento para activarse.

Las curvas de disparo de los interruptores muestran el tiempo de disparo en función de la intensidad de defecto en amperios:

- La protección contra sobrecarga indica que cuánto más alta sea la corriente, más corto será el tiempo de disparo.
- La protección contra cortocircuito indica que si la corriente de umbral es superada, el dispositivo se accionará en un tiempo inferior a 10 milisegundos.

Figura 70. Partes de la curva de disparo



Fuente: Schneider Electric. *Curvas de disparo y tablas de coordinación*. https://www.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/290000/FA290198/es_ES/Curvas%20disparo%20aparamenta%20modular%20Acti9.pdf.

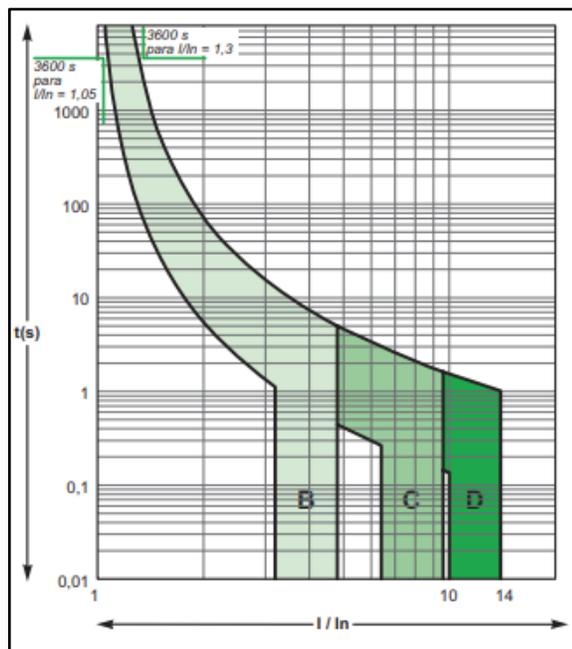
Consulta: 24 de diciembre de 2018.

Al colocar la curva de un interruptor sobre la de otro interruptor instalado aguas arriba, se puede comprobar si esta combinación será selectiva en los

casos de sobrecarga, a continuación, se describirá los tipos de curva a utilizar en una instalación eléctrica:

- Curva B: utilizada para protección de generadores, personas y cableado a gran longitud, disparo entre 2.6 y $3.85 I_n$, protección térmica estándar.
- Curva C: Protección de cables alimentando receptores clásicos, disparo entre 3.85 y $8.8 I_n$, protección térmica estándar.
- Curva D: Protección de cables alimentando receptores con fuertes puntas de arranque, disparo entre 10 y $14 I_n$, protección térmica estándar.

Figura 71. **Curvas de disparo interruptores termomagnéticos**



Fuente: Schneider Electric. *Curvas de disparo y tablas de coordinación*, https://www.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/290000/FA290198/es_ES/Curvas%20disparo%20aparamenta%20modular%20Acti9.pdf.

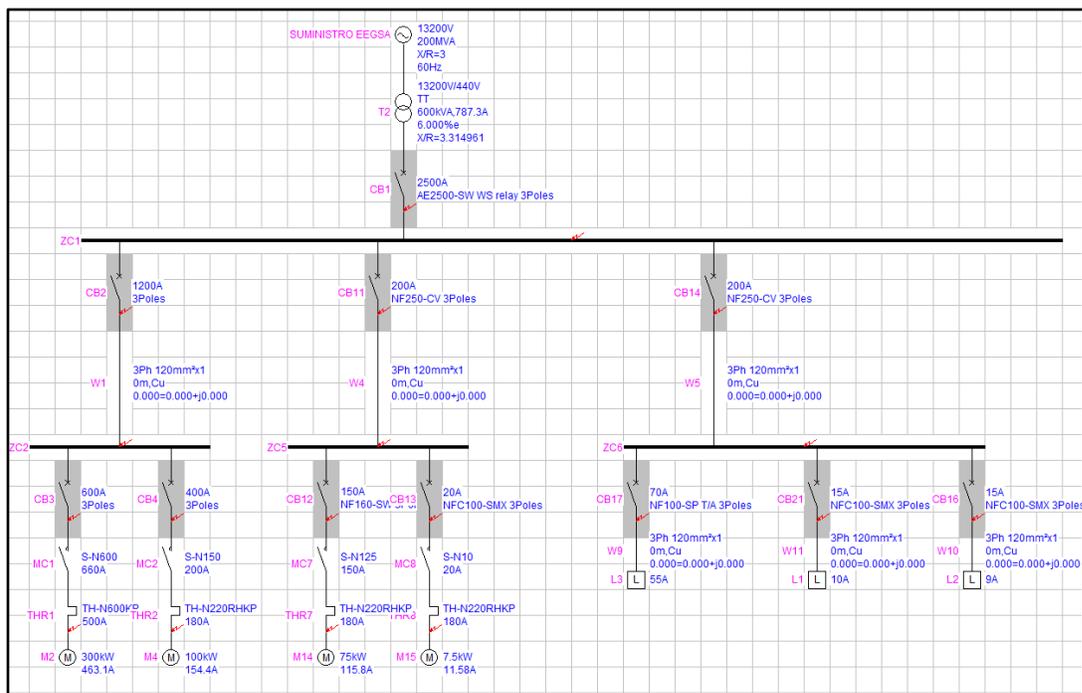
Consulta: 29 de diciembre de 2018.

La filiación refuerza el poder de corte de los interruptores situados aguas abajo de un interruptor limitador, permite utilizar un interruptor de corte inferior a la corriente de corto circuito calculada en ese punto de la instalación. El interruptor limitador ayuda al situado aguas abajo limitando las fuertes corrientes de cortocircuito.

La selectividad asegura la coordinación entre las características de funcionamiento de interruptores automáticos colocados en serie de tal manera que en caso de un efecto aguas abajo únicamente se dispara el dispositivo situado inmediatamente aguas arriba.

A continuación, se muestra el diagrama unifilar de la línea de producción:

Figura 72. Diagrama unifilar general planta de cartones moldeados

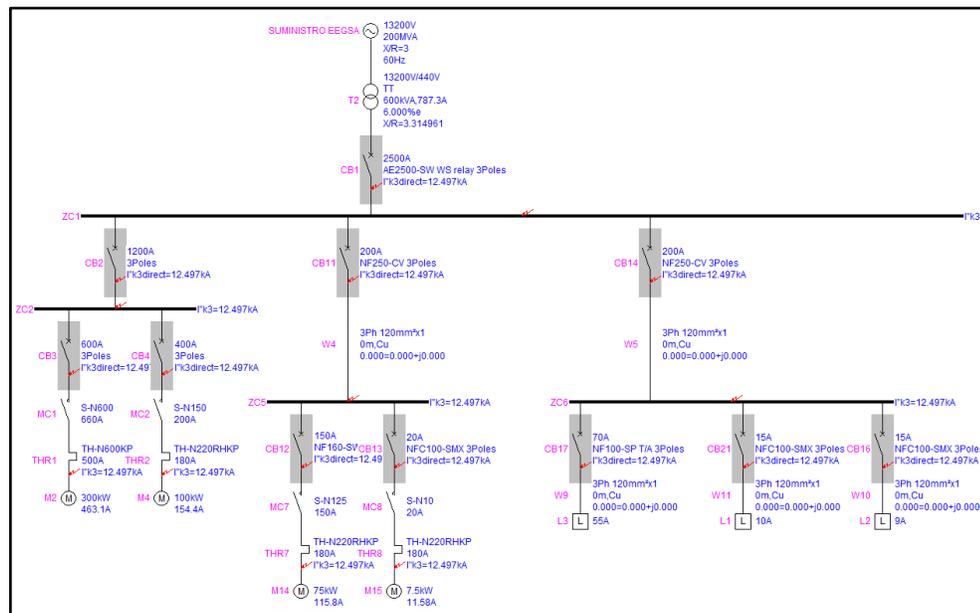


Fuente: elaboración propia, empleando Melshort2.

Luego de realizar el diseño, el software automáticamente calcula las corrientes de corte de los interruptores y tableros, el programa toma en cuenta los parámetros necesarios para filiación y selectividad de la red eléctrica.

En caso alguno de los parámetros utilizados no cumpla con las especificaciones mínimas, el programa nos notificará y no permitirá continuar con el diseño hasta su corrección.

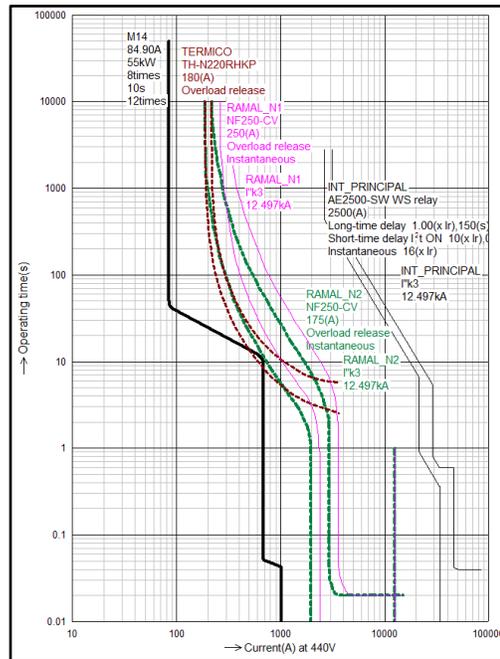
Figura 73. Unifilar con corrientes de cortocircuito



Fuente: elaboración propia, empleando Melshort2.

Se configurará la coordinación de protecciones de cada uno de los equipos, en la siguiente figura se muestra la curva característica del motor M14, con todas las protecciones que se utiliza:

Figura 74. **Curvas características de arranque de motor y protecciones**



Fuente: elaboración propia, empleando Melshort2.

Con el diseño finalizado, el software nos muestra un listado de los equipos a utilizar, debe seleccionarse los tableros e interruptores en base a estas especificaciones:

Tabla XXIX. **Listado de dispositivos de protección utilizados en el diagrama unifilar**

[Low-voltage circuit breaker]

Ref.No.	Operational voltage	Manu- facturer	Kind	Type of breakers	Pole	Rated current or Current setting	Long-time delay	Short-time delay	Instantaneous	Ics	Icu or Icn	Icu-back	Back up breaker	ON or OFF	Short-circuit current I _{k3direct}	Selected by
CB1	440V		ACB	AE2500-SW WS relay	3	2500A	1.00x Ir 150s	10x Ir 0.5s	16x Ir	85.00kA	85.00kA	-	-	ON	12.497kA	Icu
CB2	440V				3	1200A				-	-	-	-	ON	12.497kA	NG by In or Ue
CB11	440V		MCCB(Fix)	NF250-CV	3	200A	Fixed	-	Fixed	12.00kA	15.00kA	-	-	ON	12.497kA	Icu
CB14	440V		MCCB(Fix)	NF250-CV	3	200A	Fixed	-	Fixed	12.00kA	15.00kA	-	-	ON	12.497kA	Icu
CB3	440V				3	600A				-	-	-	-	ON	12.497kA	NG by In or Ue
CB4	440V				3	400A				-	-	-	-	ON	12.497kA	NG by In or Ue
CB12	440V		MCCB(Fix)	NF160-SW	3	150A	Fixed	-	2100A	13.00kA	25.00kA	-	-	ON	12.497kA	Icu
CB13	440V		MCCB(Fix)	NFC100-SMX	3	20A	Fixed	-	Fixed	12.50kA	25.00kA	-	-	ON	12.497kA	Icu
CB17	440V		MCCB(T/A)	NF100-SP-T/A	3	70A	Fixed	-	945A	13.00kA	25.00kA	-	-	ON	12.497kA	Icu
CB21	440V		MCCB(Fix)	NFC100-SMX	3	15A	Fixed	-	Fixed	12.50kA	25.00kA	-	-	ON	12.497kA	Icu
CB16	440V		MCCB(Fix)	NFC100-SMX	3	15A	Fixed	-	Fixed	12.50kA	25.00kA	-	-	ON	12.497kA	Icu

Fuente: elaboración propia, empelando Melshort2

4.2.1.2. **Supresor de transitorios**

Las redes de distribución eléctrica y de telecomunicaciones están sometidas continuamente a un número elevado de transitorios, cuyo efecto en una planta de producción podría derivar en un elevado costo: paralizar la producción, destrucción de los equipos e instrumentación o producir daños en el personal; debido a esto es recomendable instalar supresores de transitorios en distintas áreas de la red.

El limitador de sobretensiones es un dispositivo destinado a limitar las sobretensiones transitorias y derivar las ondas de corriente hacia tierra para limitar la amplitud de esta sobretensión a un valor no peligroso para la instalación eléctrica, según lo anterior es importante resaltar que para colocar un supresor de transitorios es necesario que exista un sistema de puesta a tierra.

De acuerdo con el NOM, los supresores se dividen en 3 categorías, divididas en base a su instalación dentro de la red eléctrica y su capacidad de protección; el supresor de categoría 1 se coloca fuera del edificio, propiamente en la subestación de este, en caso llegara a tener; el supresor de categoría 2 se coloca dentro del edificio, en los tableros de alimentación principales y secundarios; el supresor de categoría 3 es el más cercano a la carga (máximo 10 metros de distancia según el NOM), se coloca regularmente en los receptáculos.

Los supresores de transitorios pueden conectarse en serie o en paralelo a la carga.

El transitorio es un fenómeno que puede darse entre cualquiera de las líneas, por lo que existen distintas formas de conexión de los limitadores de acuerdo con las indicaciones de la siguiente tabla:

Tabla XXX. **Elección de la protección en función del esquema**

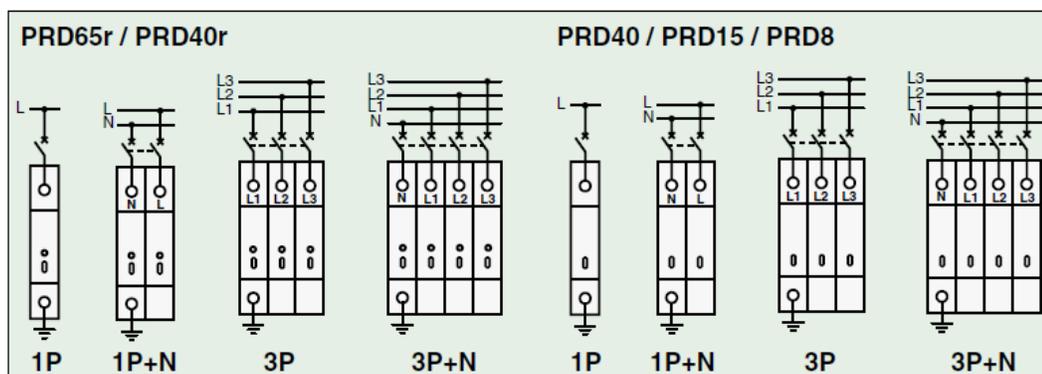
Entre	TT	TN-C	TN-S	IT
Fase y neutro	Sí (**)	–	Sí (**)	–
Fase y tierra	Sí	Sí	Sí	Sí
Neutro y tierra	Sí	–	Sí	Sí (*)
(*) salvo en el caso en el que el neutro esté distribuido				
(**) opcional				

Fuente: GERÍN, Merlín. *Guía de protección contra Sobretensiones transitorias*. p. 65.

En caso se sobrepase el valor máximo que el supresor puede soportar, éste actuará de manera correcta y limitará la sobretensión, pero se destruirá y

se creará un corto circuito, por lo que debe instalarse un interruptor termomagnético aguas arriba que proteja ante este evento.

Figura 75. **Esquema de cableado de los supresores de transitorios**



Fuente: GERÍN, Merlín. *Guía de protección contra Sobretensiones transitorias*. p. 55.

4.2.1.3. **Supresor de transitorios ethernet**

En diversas ocasiones los transitorios no ingresan únicamente por la alimentación de la red eléctrica, sino también lo hacen a través de las redes de comunicación telefónicas y Ethernet, causando errores en la configuración de los equipos o en otros casos su destrucción.

Los supresores ethernet, regularmente se utilizan en aplicaciones a la intemperie, sin embargo, existe la posibilidad que se creen transitorios por maniobra dentro de la planta, también debe considerarse que el diseño de monitoreo propuesto se diseñó de manera escalable, por lo que, en un futuro podría conectarse la red empresarial. Debido a la velocidad de datos (hasta 10 Gbit/s) que los dispositivos ethernet manejan, estos se conectan en serie al equipo que protegerán.

Figura 76. **Supresor de transitorios Ethernet**

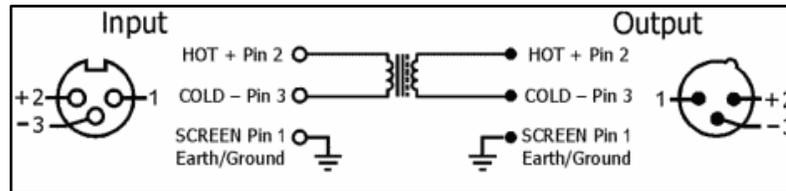


Fuente: Datasheet DT-LAN-CAT.6+

4.2.1.4. Transformadores de aislamiento

Los transformadores de control se utilizan primordialmente para elevar o disminuir el voltaje alterno, sin embargo, atenúan por efecto de inductancia las sobretensiones y hacen desaparecer por acople ciertos armónicos, por lo que pueden considerarse una protección adicional a las anteriormente mencionadas. Uno de sus principales campos de aplicación es debido a que, en la industria, por el uso de motores trifásicos de gran tamaño, es muy utilizado el voltaje 480/277VAC, y por lo regular se manejan en 120VAC (salvo excepciones en que el circuito de control también es utilizado en 480VAC). El aislamiento galvánico consiste en la separación de partes funcionales de un circuito eléctrico, a manera que no hay conexión eléctrica entre ellas. Un transformador permite el aislamiento galvánico de dos circuitos: este transforma una corriente alterna en una variación de flujo magnético, que se reconvierte en corriente eléctrica alterna por el proceso inverso. Es precisamente este contacto magnético el que permite al primario actuar sobre el secundario y viceversa.

Figura 77. **Transformador de aislamiento**

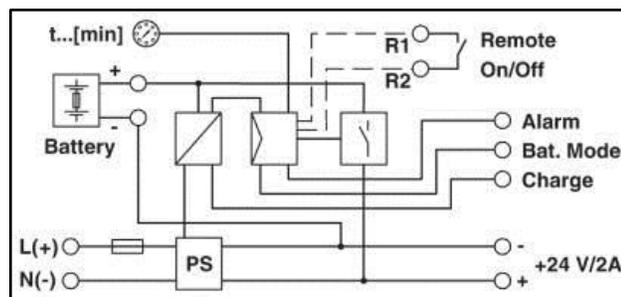


Fuente: *Transformador de aislamiento*. <http://www.equaphon-university.net/wp-content/uploads/2013/06/Post-52-Circuito-transformador-aislamiento.gif>. Consulta: 15 de enero de 2019

4.2.1.5. Fuente de alimentación ininterrumpida

Un módulo de alimentación ininterrumpida es un dispositivo que provee energía eléctrica a los dispositivos que tenga conectados, durante un tiempo limitado en un apagón eléctrico. En el sector comercial y residencial son utilizados principalmente los SAI en voltaje AC, pero para este caso, se utilizará dispositivos en corriente directa, ya que estos van colocados dentro del gabinete donde se encuentra la carga a proteger.

Figura 78. **Diagrama fuente de alimentación ininterrumpida VDC**

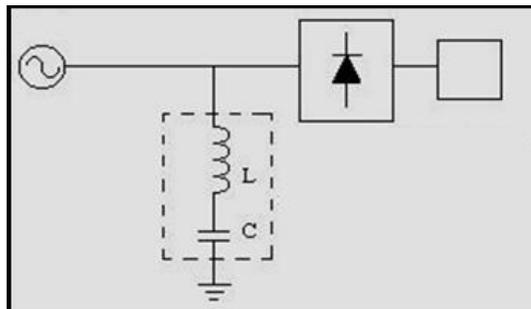


Fuente: MINI-DC-UPS/24DC/2 Datasheet

4.2.1.6. Filtros para armónicos

Los armónicos producidos por los variadores de frecuencia pueden ser reducidos en gran medida utilizando filtros entre la fuente de alimentación y la carga. Con este método se minimizan las componentes armónicas y se elimina el problema de raíz. Básicamente existen dos tipos de filtros; pasivos y activos. Los filtros pasivos están compuestos por elementos reactivos (bobinas y condensadores) conectados en paralelo a la carga. Los elementos instalados deben entrar en resonancia a la frecuencia del armónico que se desea eliminar, así la componente indeseada encontrará una pequeña impedancia en ese ramal y se drenará a tierra. Este tipo de solución se utiliza principalmente cuando se desea eliminar un armónico de frecuencia específica, ya que es posible eliminar un solo armónico de esta manera.

Figura 79. Filtro de armónicos pasivo

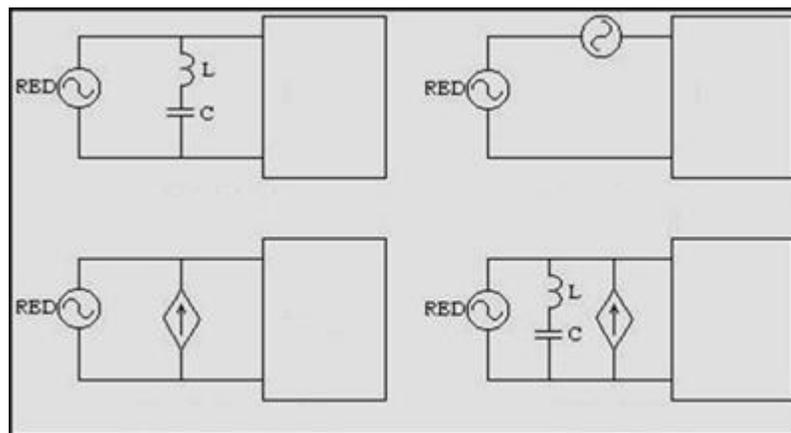


Fuente: Schneider Electric. *Active harmonic filtering and electronic VAR control*. p. 58.

Los filtros activos están compuestos por elementos pasivos y circuitos transistorizados, pueden eliminar una gran cantidad de armónicos en baja frecuencia y no tienen los inconvenientes de los filtros pasivos.

Pueden ser conectados en serie o en paralelo. Los filtros serie actúan como fuente de voltaje, proporcionan una alta impedancia para los armónicos e impedancia reducida para la frecuencia de la red. Los filtros activos en paralelo actúan como fuente de corriente en paralelo con la carga, inyectando o absorbiendo corriente según sea necesario. Existe la posibilidad de combinar filtro activo y pasivo, formando un filtro híbrido.

Figura 80. **Filtro de armónicos activo**



Fuente: Schneider Electric. *Active harmonic filtering and electronic VAR control*. p. 57.

Existe la alternativa de utilizar compensadores electrónicos, que emplean la tecnología IGBT con un sistema de control avanzado para realizar corrección de factor de potencia y disminuir los armónicos. Estos se seleccionan en base a la corriente de consumo del equipo a proteger, el sistema de voltaje y el rango en KVAR.

4.2.2. Equipos de medición de calidad de energía

En una industria, donde se cuenta con equipos electrónicos de alto valor económico, cerca de motores, compresores y maquinaria pesada en general, se debe monitorear el suministro de energía constantemente, ya que un mal suministro de energía conlleva a daños y desconfiguración de equipos que posteriormente se traducen en pérdidas para la producción.

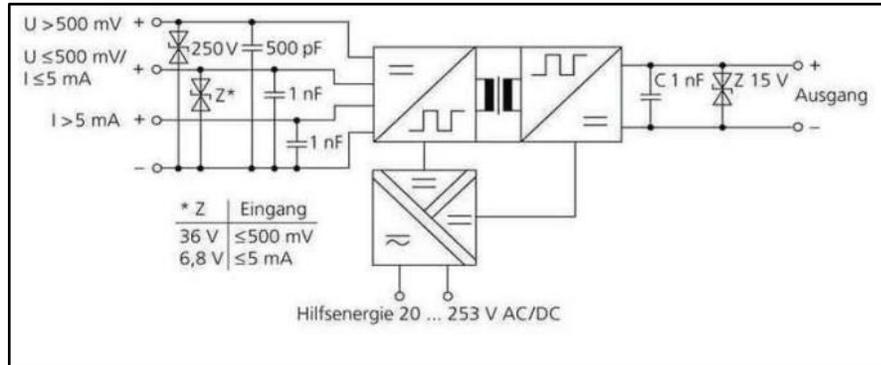
En la presente sección se abarcará las variables eléctricas pendientes del capítulo 2, ya que para la medición de parámetros eléctricos no se utilizará un controlador lógico programable, sino una solución especializada de medición de energía. La medición de energía abarcará el monitoreo de voltaje, corriente armónicos y transitorios.

Existen distintos dispositivos para realizar la medición de energía, desde el más básico que mide corriente y voltaje instantáneo (no tiene capacidad de almacenamiento de datos), hasta equipos más sofisticados y específicos, que pueden generar históricos y gráficos del comportamiento, medición de armónicos y transitorios.

4.2.3. Selección de equipos adecuados según sus características

Se utilizará aisladores galvánicos DC/DC modelo WAS4 PRO DC/DC para las señales analógicas de 0-10VAC.

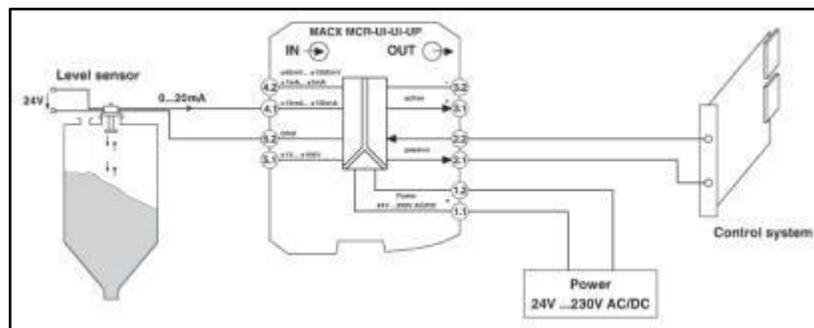
Figura 81. **Aislador galvánico AV/AV**



Fuente: Weidmuller WAS4 PRO DC/DC Datasheet.

Para los aisladores galvánicos de señales analógicas 4-20mA, se puede utilizar el módulo MACX MCR-UI-UI-UP-NC, que posee una entrada/salida 4-20mA.

Figura 82. **Aislador galvánico AC/AC**



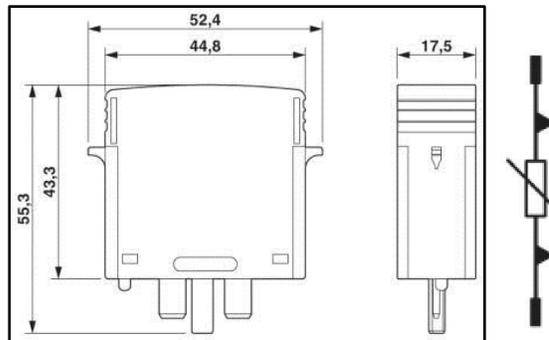
Fuente: MACX MCR-UI-UI-UP-NC datasheet.

En entradas y salidas analógicas no se considera necesario el utilizar aisladores galvánicos, ya que en su mayoría son pulsadores y luces piloto para

indicación, sin embargo, en caso exista una señal que lo amerite, se puede utilizar relés de electromecánicos o de estado sólido (dependiendo de la velocidad de conmutación y de las características del proceso). Los supresores de transitorios tipo 1, quedan fuera del alcance del diseño, ya que este es en el inicio de la acometida y corresponde en mayor parte al área de eléctrica.

Se considera el supresor de transitorios para el tablero en que está conectado el sistema de monitoreo, que es de 30P 200A en 240VAC. El modelo considerado es un supresor en trifásico 3P4H, 120/240VAC delta de 80kA. Para la protección dentro del gabinete, se considera el protector contra sobretensiones VAL-MS 120 ST, con indicación óptica para montaje en riel DIN.

Figura 83. **Supresor de transitorios VAL-MS 120 ST**



Fuente: VAL-MS 120 ST Datasheet.

Se considera un transformador de control monofásico, primario 240VAC, secundario 120VAC de 3kVA conectado a la entrada de voltaje, este irá conectado a barras para alimentar los distintos dispositivos del panel.

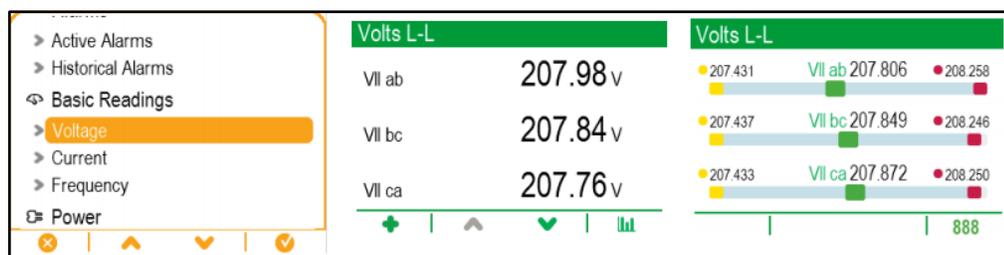
Para la medición de energía, se considerará un medidor de gama alta de la línea ION, METSEPM8240 con capacidad de análisis de captura en la forma

de onda, voltaje y corriente, distorsión hasta el armónico 63ro., medición de factor de potencia, potencia activa y reactiva, voltaje de entrada 110-415VAC, con conexión Modbus TCP/IP y pantalla integrada.

Se utilizará el software PM8000 Simulator para indicar las opciones de lectura que pueden realizarse en la pantalla del medidor.

En la opción de lecturas básicas, puede observarse la tensión de entrada en cada la línea (EE-107-001), puede mostrarse el comportamiento del voltaje línea-línea en el histórico.

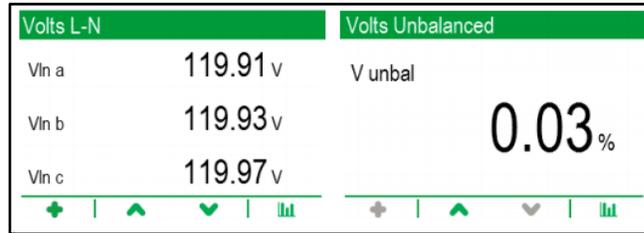
Figura 84. **Visualización de tensión L-L**



Fuente: elaboración propia, empleando PM8000 Simulator

Presionando la tecla “abajo” se accede a la pestaña que muestra el voltaje línea-neutro, también tiene la opción de mostrar el histórico y el desbalance de voltaje en forma de porcentaje.

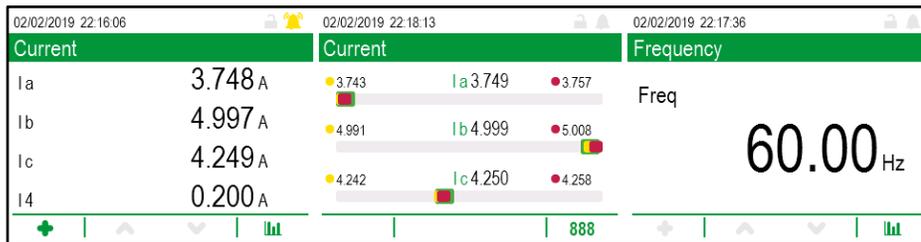
Figura 85. **Visualización de históricos tensión L-N**



Fuente: elaboración propia, empleando PM8000 Simulator

De la misma manera puede monitorearse la corriente de las líneas deseadas IE-107-002 y IE-107-001, también se visualiza la frecuencia a la que se suministra.

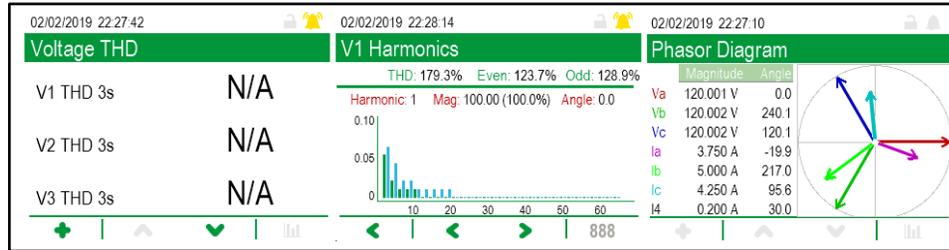
Figura 86. **Visualización de corriente en las líneas de alimentación**



Fuente: elaboración propia, empleando PM8000 Simulator

Se visualizará la cantidad de armónicos EE-107-002 y el histórico, así como los diagramas fasoriales de factor de potencia.

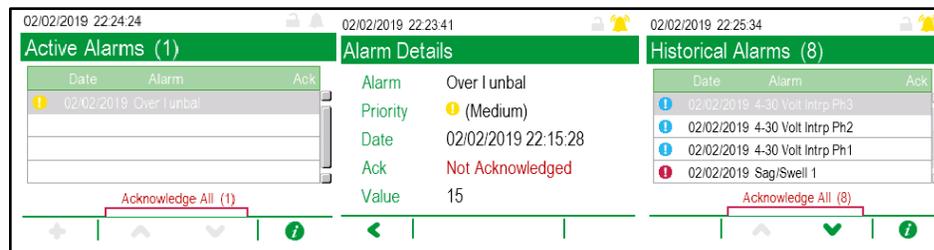
Figura 87. **Visualización de armónicos y diagramas de factor de potencia**



Fuente: elaboración propia, empleando PM8000 Simulator

Se parametrizará las variables eléctricas y en base a ello se configurará alarmas, también en este punto se configurará una alarma para que indique el momento en que se genera un transitorio EE-107-003.

Figura 88. **Configuración de alarmas e histórico**



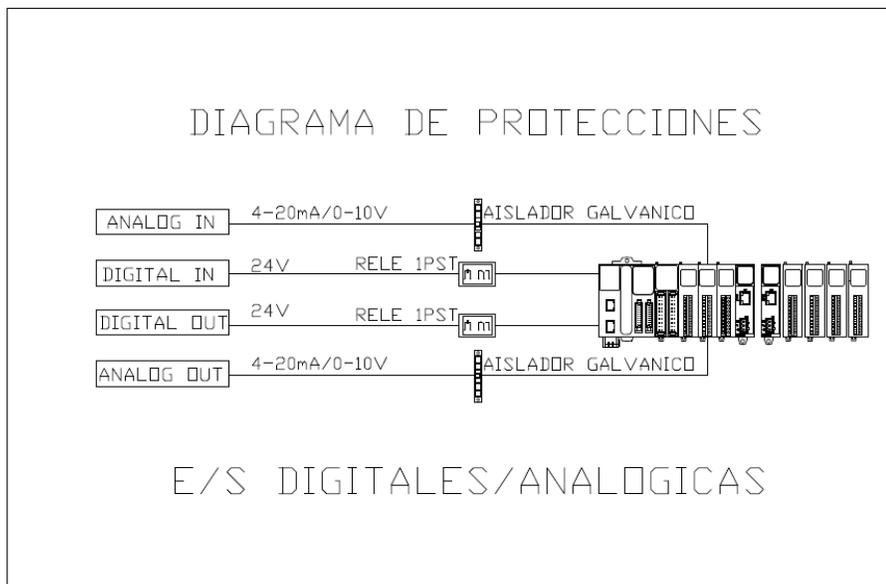
Fuente: elaboración propia, empleando PM8000 Simulator

4.2.4. Diagramas completos de protecciones

En esta sección, se muestran los diagramas de protecciones del sistema de monitoreo. Cabe resaltar, que se consideró la información recopilada y utilizada en las secciones anteriores.

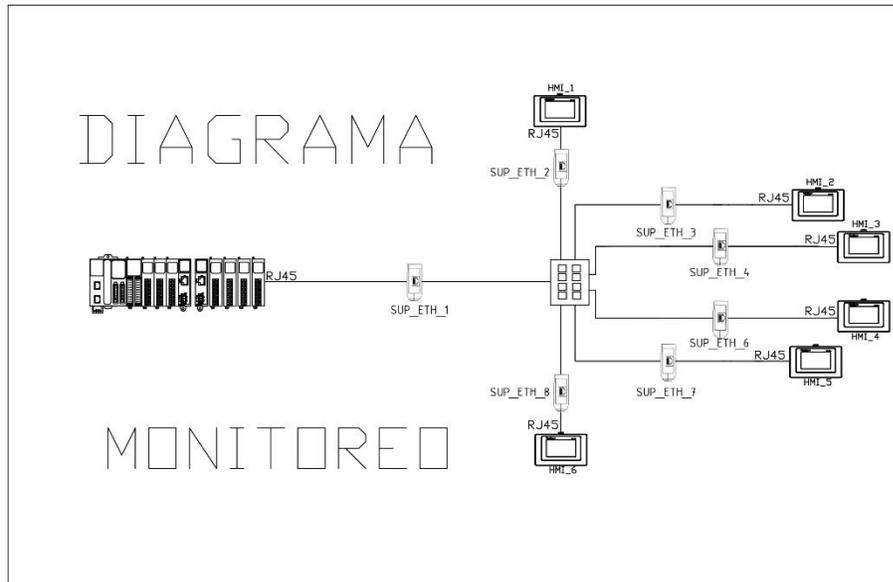
A continuación, se muestra el diagrama de protecciones utilizado para las entradas y salidas del PLC, como se mencionó anteriormente, se utilizará aisladores galvánicos de corriente 4-20mA/0-10V y relés electromecánicos simple polo simple tiro; la entrada digital del contador de cartones es el único que utilizará un relé de estado sólido.

Figura 89. **Diagrama de protecciones de entradas y salidas**



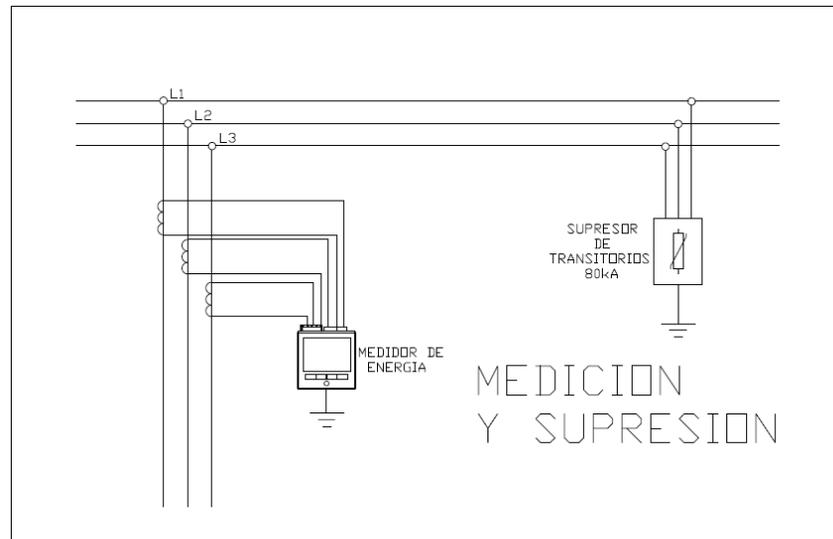
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 90. Diagrama de protecciones red de comunicación



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 91. Diagrama de supresión y medición



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

CONCLUSIONES

1. El constante monitoreo y corrección de los parámetros de proceso en una línea de producción es fundamental para asegurar la calidad del producto final.
2. La correcta señalización y visualización de los parámetros correspondientes a las variables de proceso aseguran una mejor respuesta por parte de los operarios al momento de cualquier eventualidad.
3. Estudiar a fondo el proceso que se va a automatizar para dimensionar correctamente los dispositivos transductores y actuadores que lo componen.
4. Proteger los dispositivos electrónicos ante fenómenos que afectan la red, aseguran una mejor inversión y mayor tiempo de vida de los equipos.
5. La correcta documentación en el proceso de diseño facilita la escalabilidad, compatibilidad y mantenimiento del sistema.

RECOMENDACIONES

1. Los dispositivos utilizados se dimensionaron en base a las especificaciones actuales de la planta, en caso se realice modificaciones a la línea de producción, se recomienda volver a evaluar los parámetros de proceso.
2. Revisar periódicamente el sistema de puesta a tierra para asegurar el correcto funcionamiento de los supresores de transitorios.
3. Utilizar cables en sistemas de comunicación dentro de una planta de producción deben contar con protección electromagnética para evitar corrientes parásitas que distorsionen la información.
4. Todo sistema debe considerarse como máximo a un 80 % de su capacidad, a manera de permitir futuras expansiones o inclusiones en otros sistemas.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARIZPE, J. L. *Estudio de fluctuaciones de Tensión en una red eléctrica industria por operación de cargas de gran tamaño y de las alternativas para controlarlas*. México: Universidad Autónoma de Nuevo León de México, 2001. 120 p.
2. BENÍTEZ, J. A. y MONTES, M. A. *Estudio de factibilidad técnica financiera para la fabricación de cartones para empaque de huevos usando papel reciclado*. El Salvador: Universidad Dr. José Matías Delgado, 2011. 202 p.
3. BOLTON, William. *Programmable Logic Controllers*. 6a ed. Reino Unido: Oxford, 2010. 232 p.
4. CARRERAS, S.; MAZZINI, E.; FUHR, M. *Diseño de productos en pulpa de papel moldeada*. [en línea]. <<http://reciclario.com.ar/wp-content/uploads/13542254171.pdf>>. [Consulta: 19 de enero de 2019].
5. CHAMALÉ, N. *Diseño de un sistema de control aplicable en una planta de tratamiento de agua residual*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 2016. 293 p.

6. CHÁVEZ, J. A. *La importancia de las protecciones contra sobrecorrientes en los sistemas eléctricos de potencia*. México: Universidad Autónoma de Nuevo León, 1999. 142 p.
7. CREUS, A. *Instrumentación Industrial*. México: Alfaomega, S.A., 2011. 232 p.
8. DUNN, W. *Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control*. USA: McGraw-Hill, 2006. 129 p.
9. GÓMEZ. R. *Factor de potencia de desplazamiento*. [en línea]. <https://www.ruelsa.com/notas/rt/rt126_factordepotencia.pdf>. [Consulta: 19 de enero de 2019].
10. HERRERA, J., HERNÁNDEZ O. *Cálculo de malla de puesta a tierra de una subestación*. Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, 2003. 220 p.
11. LEDESMA, P. *Regulación de frecuencia y potencia*. España: Universidad Carlos III de Madrid, 2008. 232 p.
12. MELÉNDEZ, J. *Calidad de onda en el servicio eléctrico*. México: Automática e instrumentación, 2005. 88 p.
13. MUJAL, Ramón. *Protección de sistemas eléctricos de potencia*. España: Iniciativa digital politécnica, 2014. 123 p.
14. MUNGUÍA, H. *Fenómenos transitorios*. [en línea]. <http://paginas.fisica.uson.mx/horacio.munguia/aula_virtual/Cursos>

/Instrumentacion%20I/Documentos/Análisis%20Transitorio.pdf>.
[Consulta: 19 de enero de 2019].

15. OROZCO VÁSQUEZ, Elio Alberto. *Los protocolos de comunicación en el entorno industrial, sus fundamentos y su importancia en el sistema de automatización de una planta de generación de energía geotérmica*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. 2006. 200 p.
16. PALLÁS, R. *Sensores y acondicionadores de señal*. España: Marcombo, 2004. 120 p.
17. Phoenix Contact. *Type 2 surge protection plug – VAL-MS 120ST - 2807586*. [en línea]. <<https://www.phoenixcontact.com/us/products/2807586>>. [Consulta: 19 de enero de 2019].
18. RAMÍREZ, S. *Protección de sistemas eléctricos*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2003. 192 p.
19. SAENZ, M. A. *Sistema de control en el proceso de fabricación de empaques de cartón corrugado*. Trabajo de graduación de Ing. Industrial. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2014. 392 p.
20. Schneider Electric. *Magelis HMIGTO for Vijeo Designer, User Manual*. [en línea]. <<https://www.schneider-electric.com/en/download/document/EIO0000001133/>>. [Consulta: 19 de enero de 2019].

21. _____. *Manual de usuario de la Serie PM8000 de PowerLogic*. [en línea]. <<https://www.schneider-electric.com/en/download/document/7EN02-0336/>>. [Consulta: 19 de enero de 2019].
22. _____. *XVUC29P/XVUC9VP Configuration Sheet*. [en línea]. <<https://www.schneider-electric.com/en/product/XVUC29P/ø60mm-led-unit%2C-pulse-signal---steady-flash-rotate%2C-multicolor-unit%2C-ip65%2C-24vdc/>>. [Consulta: 19 de enero de 2019].
23. SOLOMAN, S. *Sensors handbook*. 2a. ed. México: McGraw-Hill, 2010. 90 p.
24. SORIANO, B. M. *Estudio de fenómenos transitorios en circuitos eléctricos de primero orden*. Ingeniería energética. México: McGraw-Hill, 2014. 304 p.
25. TASIPANTA, C. *Estudio e implementación de sistemas de protección contra descargas atmosféricas y puesta a tierra de protección de la compañía "Helmerich and payne del rig 132"*. Ecuador: Escuela politécnica del ejército, 2002. 130 p.
26. YAKLIN, D. y LEE, K. *Method and apparatus for galvanically isolating two integrated circuits from each other*. [en línea]. <<https://patentimages.storage.googleapis.com/56/40/d6/e63d4e1dcb7332/US6249171.pdf>>. [Consulta: 19 de enero de 2019].