



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

**ALTERNATIVAS PARA LA MEDICIÓN AUTOMATIZADA DE NIVELES EN  
SILOS Y TOLVAS DE ALMACENAJE**

**Marco Roberto Segura Rodas**  
**Asesorado por Inga. Ingrid Rodríguez de Loukota**

**Guatemala, abril de 2005**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

ALTERNATIVAS PARA LA MEDICION AUTOMATIZADA DE  
NIVELES EN SILOS Y TOLVAS DE ALMACENAJE

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MARCO ROBERTO SEGURA RODAS**

ASESORADO POR INGA. INGRID RODRÍGUEZ DE LOUKOTA  
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, ABRIL DE 2005

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

***TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO***

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Inga. Ingrid Rodríguez de Loukota
EXAMINADOR	Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo
EXAMINADOR	Ing. Julio Cesar Solares Peñate
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

ALTERNATIVAS PARA LA MEDICION AUTOMATIZADA DE NIVELES EN  
SILOS Y TOLVAS DE ALMACENAJE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial con fecha septiembre de 2005.

Marco Roberto Segura Rodas  
Guatemala, Abril del 2004.

## **DEDICATORIA**

### **A Dios**

**Por haberme dado la vida, a mí y a mis seres queridos y la oportunidad de llegar hasta aquí.**

### **A mis padres**

Maco y Lilia, por su apoyo incondicional, ejemplo, sacrificio y esfuerzo a lo largo de mi vida. Por resguardarme y orientarme al camino correcto.

### **A mis hermanos**

Lucia y Juan Pablo, por haber compartido conmigo los momentos alegres y tristes de mis estudios y de mi familia.

### **A mis compañeros y amigos:**

Pérez, Vaca, Poncho, Suchí, Byron, Eva, Canito, Pancho, Shelder, Mono, Chapu, Mix, Taz, Rana, Carlos Mazariegos, Erick Deleon, porque sin ustedes el camino hubiera sido más difícil.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VI
GLOSARIO.....	VIII
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVI
1. FUNDAMENTOS.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.1.1. Medición en la era primitiva.....	1
1.1.2. Medición en la era científica.....	2
1.1.3. Medición en la revolución industrial.....	2
1.2. Metrología.....	2
1.2.1. Concepto de metrología.....	3
1.2.3. Clasificación de la metrología.....	4
1.2.3. Relación de la metrología y la calidad.....	5
1.3. Guatemala y la metrología.....	5
2. INTRODUCCIÓN A LA AUTOMATIZACIÓN.....	9
2.1. Concepto de automatización.....	9
2.1.1. Razón para automatizar.....	12
2.2. Controlador lógico programable como un administrador de señales y datos.....	13
2.2.1. Descripción general de las capacidades de los controladores lógicos programables.....	14

2.2.2.	Datos, memoria y direccionamiento.....	16
2.3.	Utilización de un controlador lógico programable como multiplicador de señales.....	17
2.3.1.	Transferencia de datos.....	17
2.3.1.1.	Niveles de red.....	17
2.3.1.2.	Configuración de redes.....	20
2.3.1.3.	Métodos de comunicación.....	20
3.	TERMINOLOGÍA Y PRINCIPIOS DE MEDICIÓN DE NIVEL.....	23
3.1.	Terminología.....	23
3.1.1.	Sistema de control.....	24
3.1.2.	Alarma.....	26
3.1.3.	Control.....	26
3.1.4.	Indicaciones.....	27
3.2.	Principios de medición.....	28
3.2.1.	Métodos mecánicos.....	28
3.2.1.1.	Método de mirilla de nivel.....	29
3.2.1.2.	Método de barra calibrada.....	29
3.2.1.3.	Interruptor de flotador.....	30
3.2.1.4.	Método de flotador/cuerda.....	30
3.2.1.5.	Método por desplazamiento.....	31
3.2.2.	Métodos electromecánicos.....	32
3.2.3.	Métodos electrónicos.....	32
3.3.	Utilización de símbolos.....	33
3.3.1.	Parámetros de análisis.....	33
3.3.2.	Funciones de conversión de parámetros de análisis...	35
4.	MÉTODOS DE MEDICIÓN DE NIVELES.....	39



4.1.	Detección y medición de niveles por métodos electromecánicos.....	39
4.1.1.	Interruptores de nivel de paleta rotativa para áridos....	39
4.1.2.	Sistemas electromecánicos de pesa de plomada para áridos.....	42
4.1.3.	Control de tanques de almacenamiento.....	43
4.2.	Detección y medición de niveles por capacidad.....	46
4.2.1.	Detección de nivel por capacidad.....	49
4.2.2.	Indicación de nivel por capacidad.....	50
4.3.	Medición de nivel por presión hidrostática.....	52
4.4.	Detección y medición de niveles por ultrasonidos.....	54
4.4.1.	Detección de niveles por ultrasonidos.....	54
4.4.1.1.	Aplicaciones.....	56
4.4.2.	Medición de niveles por ultrasonidos.....	57
4.4.2.1.	Supresión de ecos falsos.....	62
4.4.3.	Aplicaciones, modelos y calibraciones.....	64
4.5.	Medición de niveles por microondas.....	65
4.5.1.	Medición de niveles por microondas en líquidos.....	65
4.5.2.	Medición de niveles por microondas en sólidos.....	69
4.6.	Medición y detección radiométrica de niveles.....	72
4.6.1.	Definiciones y unidades de medida.....	75
4.6.1.1.	Actividad.....	75
4.6.1.2.	Dosis y dosis equivalente.....	75
4.6.1.3.	Intensidades de tasa de exposición.....	76
4.6.1.4.	Tiempo de vida media.....	76
4.6.2.	Los componentes de un sistema de medición de niveles nucleares.....	77
4.6.3.	Cálculo de la actividad de la fuente.....	78
5.	CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE SENSORES DE NIVEL.....	81

5.1.	Criterios del producto de almacenaje.....	81
5.1.1.	Requerimientos del producto.....	82
5.1.2.	Datos del producto.....	82
5.1.3.	Variables del producto.....	82
5.1.4.	Datos del proceso.....	83
5.2.	Aspectos de seguridad en la medición de niveles.....	85
5.2.1.	Normas y estándares oficiales.....	85
5.2.2.	Máximo y mínimo en la seguridad ante fallos.....	86
5.2.3.	Seguridad contra explosiones.....	88
5.2.4.	Autoseguimiento de la seguridad.....	91
5.3.	Caso práctico.....	93
5.3.1.	Caso 1, sistema de medición de nivel por el método de retorno de ultrasonidos.....	93
5.3.1.1.	Propuesta de control y descripción del sistema.....	93
5.3.1.2.	Criterios para la selección del sistema de ultrasonidos apropiado.....	95
5.3.1.3.	Equipo empleado para el control del sistema.....	98
5.3.1.4.	Disposición del control.....	99
5.3.1.5.	Beneficios obtenidos en la aplicación.....	101
5.3.2.	Caso 2, sistema de detección de nivel por el metodo de capacitancia.....	102
5.3.1.1.	Propuesta de control y descripción de sistema.....	102
5.3.1.2.	Criterios para la selección del sistema de capacitancia apropiado.....	106
5.3.1.3.	Equipo empleado para el control del	

	del sistema.....	108
5.3.1.4.	Disposición del control.....	110
5.3.1.5.	Beneficios obtenidos en la aplicación.....	112
CONCLUSIONES.....		113
RECOMENDACIONES.....		114
BIBLIOGRAFÍA.....		116

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Estructura centro nacional de metrología	7
2.	Topología de red típica para transferencia de datos de una aplicación industrial	19
3.	Topología de configuración maestro-esclavo	21
4.	Diagrama de un sistema de control en lazo cerrado	25
5.	Símbolos utilizados para la medición de nivel en un silo de almacenaje	36
6.	Diagrama unifilar utilizando los símbolos de medición de nivel	37
7.	Interruptores de nivel de paleta rotativa, alto y bajo para aridos	41
8.	Sistema electromecánico de pesa de plomada	43
9.	Gráfica de un servomecanismo	45
10.	Condensador sencillo	46
11.	Condensador conectado a una fuente de corriente alterna	48
12.	Conversión de cambio de capacidad en una variación de tensión	50
13.	Cambio de capacidad en variación de potencial	51
14.	Medición de nivel por presión hidrostática	53
15.	Detección de niveles por ultrasonidos	55
16.	Medición de nivel por ultrasonidos, método de retorno de la señal	58
17.	Membrana de sensor de nivel por ultrasonidos	59
18.	Conexión de sensor de nivel a un osciloscopio	60

19.	Umbral función del tiempo	63
20.	Medición de nivel por microondas en líquidos	66
21.	Comportamiento según el método de retorno de microondas	68
22.	Medición de nivel por microondas en sólidos	70
23.	Representación gráfica del "Mapa sonda"	71
24.	Medición y detección radiométrica de niveles	73
25.	Componentes de un sistema de medición de niveles nuclear	78
26.	Diagrama de funciones de seguridad de máximos y mínimos	87
27.	Ejemplo detector de nivel superior en un tanque con riesgo de revalse	92
28.	Tolva de almacenamiento de materia prima dispuesta a trituración	94
29.	Reflexión difusa tomada en una ladera de áridos por un sensor ultrasónico	97
30.	Depósito típico de almacenamiento de mosto en el proceso de fabricación de cerveza	104
31.	Sistema típico de detección y medición de nivel	105
32.	Conexión directa de indicadores de nivel capacitivos a un sistema de bus actual	111

## TABLAS

I	Instrucciones básicas de un PLC	84
II	Criterios de selección de sensor de nivel	79
III	Clases de equipos eléctricos según temperaturas	90
IV	Carecterísticas de algunos productos explosivos	90



## GLOSARIO

<b>Accionamiento</b>	Puesta en marcha de una máquina o dispositivo que puede tener estado de encendido o apagado.
<b>Amplificador</b>	Dispositivo electrónico que aumenta la potencia de una oscilación eléctrica.
<b>Automatización</b>	Sustitución del hombre por una máquina para realizar un trabajo determinado.
<b>BCD</b>	<i>Binary Code Decimal</i> (Codigo Binario Decimal), codificación que representa el sistema decimal (0 - 9) en una serie de números binarios (0 ó 1).
<b>Bit</b>	Ubicación discreta de memoria que tiene voltaje presente o no presente, (1 ó 0).
<b>Borne</b>	Terminal o punto de conexión eléctrica de un dispositivo.
<b>Conmutación</b>	Cambio de un estado (encendido) a otro estado (apagado).
<b>CPU</b>	<i>Central Process Unit</i> (Unidad central de procesamiento),

dispositivo central que adquiere datos de los dispositivos de entrada, identifica y analiza los datos y proporciona respuestas a los dispositivos de salida.

<b>Dieléctrico</b>	Sustancia que es mala conductora de la electricidad y que amortigua la fuerza de un campo eléctrico que la atraviesa.
<b>Frecuencia</b>	Repeticiones a menudo de un acto suceso, número de ondulaciones por segundo de un movimiento.
<b>Fusible</b>	Hilo o chapa metálica que, colocada en un circuito eléctrico se funde e interrumpe la corriente si esta es excesiva.
<b>Hertz</b>	Unidad para medir la frecuencia equivalente a 1 ciclo por segundo.
<b>Histérisis</b>	Comportamiento de un material magnético con respecto a su campo desde un campo leve hasta la saturación del campo magnético.
<b>Interconexión</b>	Conexión entre dos o más dispositivos eléctricos.
<b>Interface</b>	Circuito que permite conectar 2 ó más dispositivos con diferentes voltajes, corrientes o impedancias.
<b>Interruptor</b>	Dispositivo para interrumpir o establecer una corriente en circuito.
<b>Lógica de</b>	Estructura de programación de PLC's que supone



<b>escalera</b>	instrucciones simples una debajo de otra representando los peldaños de una escalera.
<b>Microonda</b>	Onda electromagnética cuya longitud está situada entre un milímetro y un metro.
<b>Modulación</b>	Variación en el tiempo de una de las características de una onda (amplitud, frecuencia, fase).
<b>Osciloscopio</b>	Instrumento que registra gráficamente las variaciones de una corriente o voltaje en función del tiempo.
<b>Oscilador</b>	Dispositivo electrónico que provoca la oscilación entre dos puntos de un voltaje o una corriente.
<b>Potencia</b>	Fuerza eléctrica capaz de producir un efecto mecánico.
<b>Pulso</b>	Variación abrupta de corta duración de una cantidad física seguida de un rápido retorno al valor inicial.
<b>Regulador</b>	Circuito que permite controlar o estabilizar una señal.
<b>Semiconductor</b>	Cuerpo no metálico que conduce imperfectamente la electricidad y cuya resistividad disminuye al aumentar la temperatura.
<b>Silo</b>	Despósito de almacenaje de material que se caracteriza por su forma cilíndrica.

<b>Radiación nuclear</b>	Desintegración espontánea de núcleos atómicos mediante la emisión de partículas subatómicas llamadas partículas alfa, beta y gamma.
<b>Rayo alfa</b>	Emisión que proviene de las partículas subatómicas alfa liberadas en una radiación nuclear.
<b>Rayo beta</b>	Emisión que proviene de las partículas subatómicas beta liberadas en una radiación nuclear.
<b>Rayo gamma</b>	Emisión que proviene de las partículas subatómicas gamma liberadas en una radiación nuclear.
<b>Rele</b>	Dispositivo eléctrico de dos estados, conducción de corriente y no conducción de corriente.
<b>Sensor</b>	Dispositivo mecánico sensible a los cambios mecánicos de un sistema.
<b>Temporización</b>	Acción y efecto de programar un intervalo de tiempo en un dispositivo eléctrico, para realizar un tarea específica.
<b>Termomagnético</b>	Relativo a la acción de disparo de un dispositivo eléctrico por temperatura o variación del campo magnético.
<b>Toiva</b>	Despósito de almacenaje de material que se caracteriza por su forma cilíndrica con una terminación cónica en la salida de material.
<b>Transductor</b>	Dispositivo que convierte una forma de energía en otra.

<b>Ultrasonido</b>	Onda mecánica sonora superior a la frecuencia audible por el ser humano.
<b>VCA</b>	Voltaje alterno.
<b>VCD</b>	Voltaje directo.
<b>Válvula</b>	Dispositivo utilizado para regular el flujo de un líquido o gas.
<b>Voltaje</b>	Diferencia de potencial en las terminales de un conductor o circuito.

## RESUMEN

De una manera general se puede definir a los sensores y detectores de nivel como dispositivos electrónicos diseñados para monitorear y conocer el nivel de un depósito de almacenaje, no importando el contenido del producto a almacenar. Su programación y operación pueden ser realizados por personal con conocimientos básicos de programación.

Como contraparte de control y alternativa para la administración y manejo de la comunicación entre sensores y detectores de nivel, los Controladores Lógicos Programables, (PLC's por sus siglas en inglés), ofrecen un medio eficaz para eficiencia en sistemas de control, éstos son ampliamente utilizados dentro de la industria ya que permiten no sólo la administración del sistema, sino que una amplia manipulación de datos.

En conjunto estos dispositivos permiten el monitoreo continuo y conocimiento de la cantidad de material almacenado en un depósito de manera eficiente actuando como una especie de "Caja negra" en la que se distribuye, según los requerimientos de cada aplicación, los sensores o detectores de nivel necesarios dentro de un sistema múltiple de monitoreo y detección, mientras que las variables de confiabilidad, flexibilidad y seguridad del sistema son manejadas y administradas en forma individual por medio de cada uno de los dispositivos conectados al PLC.

A la vez, por medio de la recolección de datos del procesador, cabe la posibilidad de ejercer una administración global de las señales que permita regular de una forma más amplia la operación de los depósitos de almacenaje (silos o tolvas) bajo distintas operaciones, simplificando así, para el diseñador las consideraciones a aplicar según el tipo de regulación deseado para el sistema.

# OBJETIVOS

## General

Establecer los criterios necesarios para definir el tipo de sensor de nivel a usar en un silo o tolva de almacenaje tomando en cuenta las características del producto como son: viscosidad, peso específico, corrosividad, polvos, gránulos o partículas.

## Específicos

1. Determinar la terminología, principios y símbolos de medición de nivel en silos y tolvas de almacenaje.
2. Establecer los métodos de medición de nivel en silos y tolvas de almacenaje dependiendo del producto a almacenar.
3. Establecer el criterio de la automatización como administrador eficiente en mediciones de nivel de silos y tolvas de almacenaje.

## INTRODUCCIÓN

La industria utiliza diversidad de formas de almacenaje en las líneas de producción, el almacenaje es parte indispensable en el flujo de cualquier proceso en partes intermedias o como producto terminado ya que de éste depende la cantidad de producción, también existen depósitos de almacenaje que forman parte del proceso y de éstos depende la calidad del producto, por ejemplo, los depósitos de fermentación en el proceso de la cerveza.

Los silos y tolvas de almacenaje se caracterizan por ser de gran tamaño y constitución muy robusta, es decir, silos de forma cilíndrica de hasta 25 metros de altura o tolvas de distribución de producto de hasta 10 metros de altura; la robustez de estos depósitos de almacenaje ocasiona que la medición del producto sea complicada además, se debe monitorear en forma bastante precisa el movimiento del producto dentro del depósito de almacenaje.

La medición de nivel es indispensable en la industria para conocer la cantidad de producto que se encuentra dentro de un depósito de almacenaje y para llevar a cabo esta medición existen diversidad de métodos, abarcando desde niveles mecánicos hasta niveles completamente electrónicos sofisticados, la evolución de la electrónica tiene como consecuencia una medición mucho más exacta, utilizando diferentes formas de medición dependiendo del producto que se encuentre almacenado.





# **1 FUNDAMENTOS**

## **1.1 Antecedentes**

La necesidad que ha tenido el hombre de conocer la cantidad de las cosas lo ha llevado a comparar, este proceso en forma sistemática se llama medición, de aquí que su definición es la determinación de las dimensiones de cualquier cosa, la cual se ha desarrollado según las necesidades del ser humano, su crecimiento y evolución.

### **1.1.1 La medición en la era primitiva**

Desde sus orígenes el hombre manifestó un instinto natural hacia realizar mediciones subjetivas, es decir, le resultaba fácil distinguir entre dos cantidades como “poco” y “mucho”. Este mismo instinto, desarrollado en menor grado es propio de los animales.

El ser humano mide en cada momento, por ejemplo: al comparar la belleza de un atardecer con el del día anterior, o de una pintura contra otra. Comparar no es otra cosa que realizar una medición, como lo menciona Protágoras: “El hombre es la medida de todas las cosas”.

El hombre se estableció en comunidades, sus mediciones pasaron de lo subjetivo a lo objetivo, ya que le fue indispensable realizar trueques, que a su vez, lo obligó a crear marcos de referencia e instrumentos de medición cada vez más universales como el calendario, los relojes de sol, las balanzas y muchos otros más.

### **1.1.2 La medición en la era científica**

No fue hasta Galileo que las mediciones dejaron de ser sólo subjetivas para serlo objetivas y científicas. En Francia, a fin de unificar criterios metrológicos se reúnen Borda, Laplace y Lagrange quienes proponen el metro como la diezmillonésima parte del meridiano terrestre, ésto sirvió de base para un sistema decimal internacional de unidades. En 1796 se deposita en los archivos de París el primer metro patrón de platino. En 1837, se establece en Francia el Sistema Métrico Decimal como obligatorio. Posteriormente se crea el Buró Internacional de Pesas y Medidas.

### **1.1.3 La medición en la Revolución Industrial**

Con la revolución industrial surge la necesidad de controlar los procesos de fabricación, lo que implica efectuar mediciones durante los mismos, ya que “No se puede controlar ni mejorar lo que no se mide”. De igual manera la automatización de los procesos implica una multiplicación de mediciones.

Por otra parte las investigaciones y el comercio requieren también soportar sus criterios en sistemas de medición, además de un vocabulario común para facilitar su desempeño. Como respuesta a todas estas necesidades, se desarrolla una metrología como hoy se conoce.

## **1.2 Metrología**

Aunque no es muy conocida, está en contacto diario, desde actividades comunes y corrientes a las cuales no se les presta atención como el aseo personal, el consumo de energía eléctrica, agua potable y combustible, hasta aquellas de gran importancia que pueden afectar la vida, la salud y el ambiente, por ejemplo, la medición de la presión arterial, la temperatura del cuerpo, los análisis de laboratorio, la fabricación de medicinas, y hasta de los desechos sólidos producidos por la industria.

### **1.2.1 Concepto de metrología**

La metrología deriva del griego *μετρον* que significa medida y *λογος* que significa tratado, por lo que su interpretación es “tratado de medidas”. En términos generales es definida como la ciencia y técnica que tiene por objeto el estudio de los sistemas de pesos y medidas así como la determinación de las magnitudes físicas utilizadas para dicha medición, juega un papel fundamental en las actividades comerciales e industriales que el hombre desarrolla. Le permite tener un mejor conocimiento de su entorno para adecuarlo a sus necesidades. Se puede afirmar que en la medida que se mejore las mediciones, se mejorará el conocimiento de la realidad.

Históricamente esta disciplina ha pasado por varias etapas; inicialmente el objeto de su estudio fue el análisis de los sistemas de pesos y medidas antiguos, cuyo conocimiento se observa necesario para la correcta comprensión de los textos antiguos.

A mediados del siglo XVI el interés por la determinación de la medida del globo terrestre pusieron de manifiesto la necesidad de un sistema de pesos y medidas universal, proceso que se vio agudizado durante la revolución industrial culminando con la creación de la Oficina Internacional de Pesos y Medidas y la construcción de patrones para el metro y el kilogramo en 1872.

Establecidos ya patrones de las unidades de medida fundamentales por la oficina mencionada, la metrología se ocupa hoy día, sin olvidar su vertiente histórica, del proceso de medición en sí, es decir, del estudio de los procesos de medición, incluyendo los instrumentos empleados, así como de su calibración periódica; todo ello con el propósito de servir a los fines tanto industriales como de investigación científica

### **1.2.2 Clasificación de la metrología**

La metrología según su campo de aplicación se divide en: metrología científica, metrología industrial y metrología legal. Cada una de estas ramas tiene una función especial de apoyo a los diferentes sectores de la sociedad.

- ***Metrología legal***, es la rama de la metrología que se encarga de la normalización de las mediciones y de la coordinación de los sistemas metrológicos y sus lineamientos, a fin de respaldar los intercambios comerciales que la entidad necesite.
- ***Metrología científica***, es la rama responsable del mantenimiento de los patrones primarios, del diseño y reproducción de los sistemas primarios, así como del respaldo en las investigaciones y desarrollos de la ciencia.
- ***Metrología industrial***, es aquella que se relaciona con la industria y el comercio. Ésta persigue promover la competitividad a través de la permanente mejora de las mediciones que inciden en la calidad del producto. Soporta las actividades de producción de la industria en general.

### **1.2.3 Relación de la metrología y la calidad**

En la actualidad los sistemas de calidad en la industria son tema fundamental para la supervivencia de la misma. La globalización y la integración de economías por bloques, obliga a las empresas a ser más competitivas y a que sus productos cumplan con los estándares internacionales, los cuales son elaborados bajo un sistema de calidad como el ISO 9000. Estas normativas ponen de manifiesto el controlar el equipo de medición "Controlar los equipos de inspección medición y prueba de tal forma que la incertidumbre de la medición sea conocida y consistente con la capacidad de medición.

### 1.3 Guatemala y la metrología

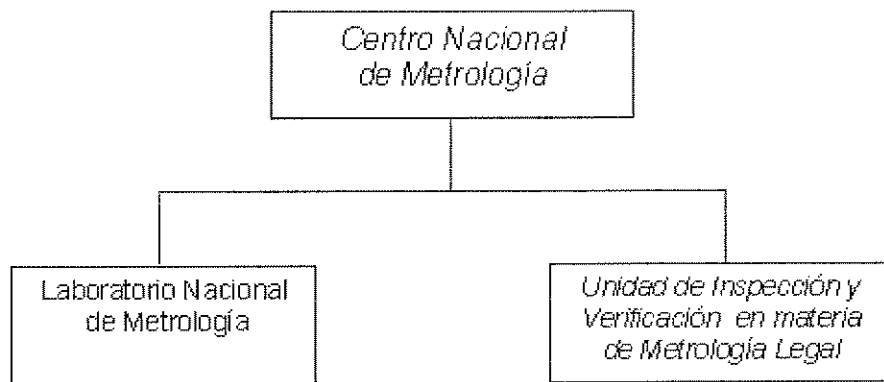
Tanto los consumidores como los empresarios necesitan tener certeza del contenido exacto del producto adquirido como del comercializado. La globalización de los mercados, hace necesario que las unidades de medida sean uniformes en todos los países, para que exista un solo lenguaje en lo que a mediciones se refiere, por ejemplo, si se adquiere un litro de cualquier producto, este debe contener la misma cantidad en Guatemala, Alemania, Japón o en cualquier otro país.

El Centro Nacional de Metrología fue establecido por el Acuerdo Gubernativo 57-2003 el 7 de marzo del año 2003, que modifica el Artículo 11 del Acuerdo Gubernativo 182-2000 del 12 de mayo de 2000, como una unidad de la Dirección del Sistema Nacional de Calidad, conformado por el Laboratorio Nacional de Metrología y la Unidad de Inspección y Verificación en materia de metrología legal.

El Laboratorio Nacional de Metrología se encuentra ubicado en el interior de la Dirección General de Energía del Ministerio de Energía y Minas, 24 Calle 21-12, Zona 12. Inició la prestación de servicios el 16 de agosto de 2,001 en las magnitudes masa gruesa, masa fina y termometría.

Actualmente el Laboratorio Nacional de Metrología está prestando servicios de calibraciones en la magnitud de termometría de líquido en vidrio (en el rango de  $-20$  a  $240$  grados celsius y calibraciones de masa patrón en el rango de  $1$  miligramos a  $20$  kilogramos. Actualmente está en proceso el diseño e implementación de la unidad para dar apoyo a otras dependencias y organismos del estado.

Figura 1. Estructura del centro Nacional de Metrología



Fuente: Ministerio de Economía, **Dirección del Sistema Nacional de Calidad**,

[www.mineco.com.gt](http://www.mineco.com.gt)

El Centro Nacional de Metrología por medio del Laboratorio Nacional de Metrología, se encuentra participando en los estudios la intercomparación de masa y temperatura, promovida por el SIM (Sistema Interamericano de Metrología) en la Región CAME (Centro América y México), siendo el Centro Nacional de Metrología de México (CENAM) el piloto de estas intercomparaciones.

Las masas llegaron a Guatemala el 11 de agosto del 2003, procedente de Costa Rica y permanecieron en el país por tres semanas y luego fueron trasladadas a El Salvador para continuar con el proceso.

En febrero del 2004, se inició la intercomparación de termómetros de líquido en vidrio, con un juego de termómetros que fueron adquiridos con apoyo del proyecto CHINA CTCAP/NORMAS.

Los resultados de estos estudios son fundamentales para determinar y mantener la competencia técnica de los laboratorios nacionales participantes.



## 2 INTRODUCCIÓN A LA AUTOMATIZACIÓN

### 2.1 Concepto de automatización

El hablar de automatización equivale sin lugar a dudas, hablar sobre los controladores lógicos programables, de hecho, el término automatización que viene del latín *automatus* y que quiere decir voluntario, espontáneo o automovimiento. Este término comenzó a escucharse antes de la década de 1970, popularizándose totalmente para la década de 1980, encerrando un nuevo concepto en la industria que, aunque no significaba una independencia o autonomía de control en la maquinaria, esto podía relevar y simplificar los procesos y controles industriales permitiendo a la vez la realización de tareas cada vez más complejas. Características que tuvieron un gran auge en la industria ya que permitían mejorar la calidad y volumen de producción a la vez que se daba una reducción del número de personas necesarias para operación de maquinaria y realización de procesos.

Un autómeta o, correctamente llamado, controlador lógico programable (PLC, por sus siglas en inglés *Program Logic Control*) en su definición fundamental, queda descrito como un dispositivo electrónico que controla máquinas y procesos.

Utiliza una memoria programable para almacenar instrucciones y ejecutar funciones específicas que incluyen control de activación y desactivación (*on/off*), temporización, conteo, secuencia, aritmética y manejo de datos.

El desarrollo de los PLC comenzó en 1968 en respuesta a una petición de la División Hidrodinámica de *General Motor (GM)*. En ese entonces, GM frecuentemente usaba días o semanas reemplazando sistemas inflexibles de control basados en relé, siempre que cambiaba modelos de automóviles o hacía modificaciones de línea de producción. A fin de reducir el alto costo del recableado, la especificación de control de GM pedía un sistema de estado sólido que tuviera la flexibilidad de una computadora, pero que los ingenieros de planta y los técnicos pudieran programar y dar mantenimiento, en otras palabras, que fuera muy sencillo de utilizarlo. Además, tenía que ser resistente a la contaminación del aire, la vibración, el ruido eléctrico, la humedad y temperaturas extremas, las cuales son características de un ambiente industrial.

El primer PLC se instaló en 1969 en la fábrica de GM en Estados Unidos de Norte América y rápidamente se convirtió en un éxito. Aún los primeros PLC's, que funcionaban como reemplazos de relés, eran más confiables que los sistemas basados en éstos, debido a que principalmente la robustez de sus componentes de estado sólido comparada con la de las partes móviles en los relés electromecánicos.

En Guatemala, al igual que en muchos otros países latinoamericanos, este auge de automatización empezó a reflejarse en la década de 1980, pero el hecho de enfrentarse a un alto costo para automatizar hizo su desarrollo de forma lenta pero sostenida hasta nuestros días, desarrollo que logró destacar en los PLC's sus cualidades de otorgar un ahorro de material, de instalación, localización y corrección de problemas así como en la mano de obra al reducir el cableado a realizar y los correspondientes errores en el mismo. Además, ocupa menos espacio físico que los contadores, temporizadores y otros componentes de control que éste reemplaza. Su capacidad para ser reprogramados aumentó notablemente su simpatía cuando se cambiaban los diagramas de control.

Tal vez la clave principal para la aceptación de los PLC's en la industria fue el lenguaje de programación inicial que esté basado en los diagramas de escalera y símbolos comúnmente usados por electricistas. Casi todo el personal de planta ya estaba capacitado en lógica de escalera y fácilmente la adoptaron para los PLC's. De hecho este tipo de programación juega un papel muy importante en la programación, localización y corrección de problemas, hoy en día, se han desarrollado lenguajes de programación mucho más avanzados.

### 2.1.1 Razón para automatizar

Una regla general aceptada es que los PLC's son económicamente viables en sistemas de control que requieren de tres o más relés, gracias a una economía global, altamente competitiva existente en Guatemala. Se pueden encontrar en el mercado una gran diversidad de PLC's que se subdividen en micro, pequeño, mediano y grande refiriéndose al tamaño físico respectivo.

Estos dispositivos han seguido una curva de desarrollo de producto similar a la de las computadoras personales; los primeros PLC's eran grandes físicamente así como costosos, a la vez que tenían relativamente pocas características, pero con la evolución de los microprocesadores y otros componentes se hicieron más sofisticados, reduciendo su tamaño y costo, tanto que unido al énfasis que los fabricantes ponen en la productividad y la calidad, el debate del costo se vuelve casi inmaterial.

Además del ahorro en costos, los PLC's proporcionan muchos beneficios de valor agregado. Estos son:

- **Confiabilidad.** Una vez que un programa se ha escrito y se han localizado y corregido errores, este punto puede fácilmente transferirse y descargarse a otros PLC's. Esto reduce el tiempo de programación, reduce la localización y corrección de errores en otros sistemas, lo que aumenta la confiabilidad. El único cableado necesario es la alimentación eléctrica y las entradas y salidas.
- **Flexibilidad.** Las modificaciones del programa pueden hacerse en muy poco tiempo, haciendo más fácil implementar actualizaciones al sistema.

- **Funciones avanzadas.** Los PLC's pueden ejecutar una amplia variedad de tareas de control, desde una sola acción repetitiva hasta el control complejo de datos.
- **Comunicaciones.** La comunicación con interfaces de operador, otros PLC's o computadoras, facilita la recolección de datos y variables, así como el intercambio de información.
- **Velocidad.** Ya que algunas de las máquinas automatizadas procesan miles de ítem por minuto, muchas aplicaciones de automatización requieren de la capacidad de respuesta rápida del PLC.
- **Diagnóstico.** La capacidad de localización y corrección de problemas de los dispositivos de programación y diagnóstico que residen en el PLC permiten a los usuarios a localizar y corregir fácilmente los problemas de *software* y *hardware*.

## **2.2 El controlador lógico programable como un administrador de señales y datos**

En cualquier tipo de aplicación, el uso de los PLC's ayuda a aumentar la competitividad. Los procesos que usan autómatas incluyen: empaçado, embotellado y enlatado, manejo de materiales, maquinado, generación de alimentación eléctrica, sistemas de control de aire acondicionado, sistemas de seguridad, coordinación de movimiento, líneas de transporte y tratamiento de agua. Se observa fácilmente que los autómatas se aplican a una gran variedad de industrias incluyendo alimentos y bebidas, automotriz, química, plásticos,

pulpa y papel, farmacéutica y metales. De hecho cualquier aplicación que requiere de control eléctrico puede utilizar un PLC.

### **2.2.1 Descripción general de las capacidades de los controladores lógicos programables**

La capacidad de un PLC se determina por el tipo de comandos que el usuario puede programar para que se ejecuten, aunque el conjunto de instrucciones y de los nombres de las instrucciones pueden variar ligeramente dependiendo del fabricante.

Los PLC's inicialmente se diseñaron para funcionar como reemplazos electrónicos de los dispositivos de control cableados, pero en la actualidad abren nuevas posibilidades de control con funciones avanzadas tales como: matemáticas, comparación de datos, manejo de datos (clasificación de partes o seguimiento de fallos), sofisticadas rutinas, secuenciadores (reemplazando los secuenciadores mecánicos de tambor) y otras funciones que pueden ser apreciadas por las personas que diseñan sistemas de control.

## Tabla I. Instrucciones básicas de un PLC

### Instrucciones de lógica de relé

- Examina si es cerrado (contactos normalmente abiertos)
- Examina si es abierto (contactos normalmente cerrados)
- Activación de salida
- Enclavamiento de salida
- Desenclavamiento de salida

### Temporizadores

- Temporizador a la conexión
- Temporizador a la desconexión
- Temporizador retentivo

### Contadores progresivos y regresivos

### Contadores de alta velocidad

### Instrucciones Matemáticas

- Suma
- Resta
- División
- Multiplicación
- Borrar
- Raíz cuadrada

### Lógica Booleana

- AND, OR, OR exclusivo, NOT y cambio de signo

### Comparación

- =, ≠, <, >, ≤, ≥

### Manejo de datos

- Transferencia, transferencia con máscara
- FIFO, Y LIFO (primero en entrar, primero en salir, último en entrar, primero en salir)
- Conversión de BDC a binario
- Conversión de binario a BDC

### Instrucciones específicas de la aplicación

- Secuenciador
- Desplazamiento de bits

### Flujo de programa

- Subrutina
- MCR (reestablecimiento del control maestro)
- Entrada o salida inmediata con máscara
- Interrupción temporizada seleccionable
- Saltos

Fuente: "Micro Mentor", Rockwell Automation, [www.ab.com](http://www.ab.com)

### 2.2.2 Datos, memoria y direccionamiento

Como su nombre lo indica, los controladores lógicos programables tienen una memoria programable que permite a los usuarios desarrollar y modificar programas de control. Ya que la memoria es un espacio físico, los datos son información almacenada en este espacio. La unidad central de procesamiento o CPU (por sus siglas en inglés), al igual que una computadora, maneja los datos utilizando dígitos binarios o *bits*. Un *bit* es una ubicación discreta que tiene un voltaje presente o no presente y leídos por un valor de 0 ó 1, por lo tanto, los datos son un patrón de cargas eléctricas que representan un valor numérico.

Un *bit* es la unidad más pequeña de memoria disponible y para una mejor manipulación de la misma, generalmente las CPU's procesan y almacenan datos en grupos de 16 *bits*, también conocidos como "palabras". Sin embargo los usuarios pueden manipular datos al nivel de *bits*.

Cada palabra de datos tiene una ubicación física específica en la CPU llamada una "dirección" o "registro" y para cada elemento se asigna entonces una referencia con una dirección para indicar donde se encuentran los datos para ese elemento lo que permite finalmente la manipulación de los datos que incluye dicho registro. Aunque los PLC's operen en un sistema binario (1 y 0), éstos pueden convertir, aceptar y manejar los datos de otros sistemas numéricos como:

- ✓ Decimal
- ✓ Hexadecimal
- ✓ Decimal codificado en binario (BCD)
- ✓ Octal
- ✓ Código gray



## **2.3 Utilización de un controlador lógico programable como multiplicador de señales**

Un programa es una serie de instrucciones o comandos desarrollados para darle al PLC una indicación para la ejecución de acciones y como tal un lenguaje de programación proporciona reglas, para combinar instrucciones de manera que produzcan las acciones deseadas.

El lenguaje de programación más usado para los PLC's es la lógica de escalera, de hecho, más programas de autómatas se escriben en escalera que en cualquier otro lenguaje aunque ocasionalmente se utilizan también otros programas, como por ejemplo *BASIC*, C y Booleano, que en combinación con lenguajes de programas que requieren instrucciones complejas y cálculos grandes facilitan en general la manipulación de datos para ser implementados con un programa de lógica de escalera. En conclusión, las instrucciones que se utilizan para programar la mayoría de los PLC's se basan en una combinación de booleano, lógica de escalera y expresiones nemónicas, que no es más que un término para recordar una instrucción mucho más completa.

### **2.3.1 Transferencia de datos**

Una de las características más útiles y versátiles de un PLC es su capacidad de transferir y manejar datos, esta capacidad lo convierte en una poderosa plataforma de procesamiento, que cambia valores de datos en archivos enteros, los registros pueden copiarse, sumarse, restarse o cambiarse en una incalculable combinación de operaciones para lograr un registro final que cumpla con las características de operación que se utilizarán.

Como ejemplo, podríamos tener el valor de referencia de velocidad para dos motores determinados, en el cual uno podría girar a 90% de la velocidad comandada para el otro, se busca entonces el modificar dicho registro y manipular con la ayuda de distintas instrucciones, tratar de obtener que se consiga como resultado un nuevo registro afectado con un 10% de velocidad menor que el registro original fuente. Finalmente dichos datos son transferidos del PLC al dispositivo que lo utilizará como referencia de trabajo.

En general, es gracias al creciente desarrollo de los autómatas paralelo con equipo de computación y redes de comunicación, lo que ha llevado a la automatización al desarrollo de equipos que puedan comunicarse entre unos y otros, permitiendo al PLC leer, manipular y posteriormente realizar el envío de ciertos datos a equipos periféricos que pueden contar o no con cierto grado de inteligencia para la realización de una tarea específica, es decir, tiene la capacidad de toma de decisiones basado en una experiencia previa comparando datos en la memoria de un ordenador.

Este creciente desarrollo ha dado a los PLC una gran variedad de opciones para la transferencia de datos que abarcan una combinación de señales digitales, el tratamiento de señales analógicas de corriente y voltaje o inclusive el envío de datos por medio de redes de comunicación.

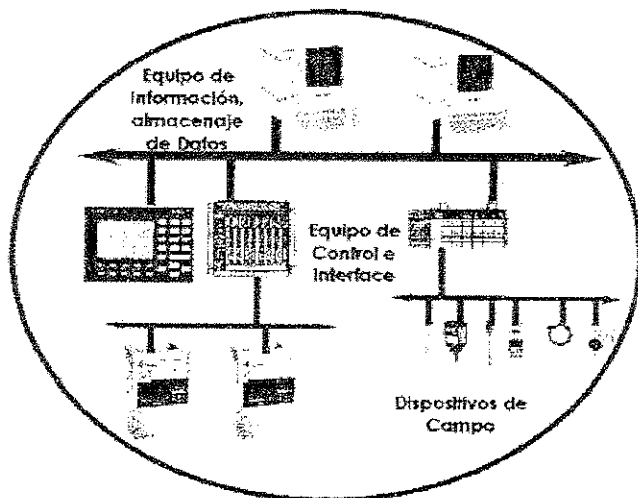
### 2.3.1.1 Niveles de red

Con la finalidad de satisfacer las distintas necesidades de comunicación en la industria, se han desarrollado redes que poseen un distinto nivel de acceso. Los distintos niveles de red permiten entonces una mejor comunicación y transferencia de datos entre los dispositivos de control, automatización e información.

La clasificación de los niveles es la siguiente:

- **Dispositivos de campo:** se especializan en el procesamiento de todas las señales (analógicas, digitales, de entrada, de salida, etc.) de los dispositivos de campo (detectores, selectores, actuadores o motores, etc.) y que son utilizados en el proceso industrial directamente.
- **Control y automatización:** dedicada al procesamiento de las tareas de automatización y control de los procesos industriales que permite la interconexión de PLC's y equipos de interface especializados para visualización y control de los procesos industriales.
- **Información y almacenamiento de datos:** procesamiento de tareas de carácter general, útiles en toda industria para efectos de supervisión, análisis de datos, optimizaciones y reportes.

Figura 2. Topología de red típica para transferencia de datos de una aplicación industrial



Fuente: "Micro Mentor", Rockwell Automation, [www.ab.com](http://www.ab.com)

### 2.3.1.2 Configuración de redes

Existen también distintas configuraciones de red que permiten la comunicación entre los dispositivos y que se refieren más a las diferentes estructuras físicas que éstas pueden presentar, generalmente se seleccionan dependiendo de la aplicación a realizar, las configuraciones para una red de control que más desarrollo han tenido en la industria en general son las siguientes:

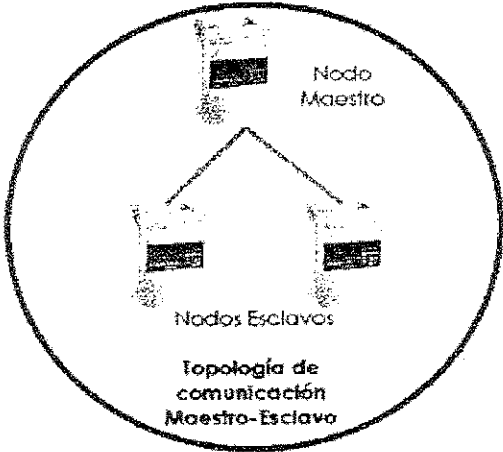
- **Punto a punto:** interconexión entre dos equipos, colocados en dos puntos físicos distintos.
- **Bus o lineal:** representa el modelo más empleado de redes; consiste en un modelo de cable troncal o matriz, al que se conecta cada una de las estaciones por medio de un cable en derivación.

### 2.3.1.3 Métodos de comunicación

Al igual que las distintas opciones de redes, los métodos de comunicación utilizados difieren mucho respecto al tipo de equipo que se quiera comunicar, pero en Guatemala para la comunicación de equipos entre el nivel de control y el de dispositivos de campo, tiende a concentrarse en dos distintos métodos de comunicación siendo los mismos:

- **Punto a punto:** método ampliamente utilizado para la comunicación entre dos dispositivos con la finalidad de transferir información, generalmente entre dispositivos en los que uno posee cierta inteligencia y el otro sirve para recoger señales o como medio de visualización e interface.
- **Maestro–esclavo:** este método es comúnmente utilizado en redes por su sencillez y practicidad. Todo tráfico de información es controlado por un nodo maestro, todos los mensajes y datos son iniciados por él y no se hace necesaria la comunicación entre sí por los nodos esclavos. Por consiguiente los nodos esclavos sólo se comunican si el maestro lo requiere, el maestro manda una señal de referencia que puede ser de velocidad, posición o fuerza, el esclavo hace caso a esa señal y en respuesta “si el nodo maestro lo solicita” puede dar una señal de retroalimentación real para corrección de desviaciones en relación a la señal de referencia.

Figura 3. Topología de configuración maestro-esclavo



Fuente: "Micro Mentor", Rockwell Automation, [www.ab.com](http://www.ab.com)

## **3 TERMINOLOGÍA Y PRINCIPIOS DE MEDICIÓN DE NIVEL**

### **3.1 Terminología**

Como cada rama de la ciencia y la ingeniería, la ingeniería de medición y control también tiene su propia terminología específica. Por desgracia, al contrario de lo que sucede en la construcción, el ámbito económico o la aeronáutica, para la medición y el control no existe una terminología universal o de uso común. La razón principal de ello es que el concepto de ingeniería de medición y control abarca un área extremadamente amplia, desde el simple interruptor de flotador hasta el microprocesador. A menudo, la terminología empleada es específica de una rama industrial determinada.

En el presente se trata únicamente la indicación y detección de datos de proceso mediante sensores de nivel, así como su relación con PLC's. El equipo para la corrección de datos mediante el control de válvulas o bombas no están incluidos por ser un tema amplio relacionado.

La ingeniería de medición y control se puede definir como el empleo de instrumentos para la detección, el procesamiento de datos y la corrección de los datos procesados.

El concepto general medición de nivel se puede dividir en los siguientes términos:

- Sistema de control
- Alarma
- Control
- Indicaciones

### **3.1.1 Sistemas de control**

El objetivo de un sistema de control es el de gobernar la respuesta de un sistema, sin que el operador intervenga directamente sobre sus salidas. Dicho operador manipula únicamente las magnitudes de referencia y el sistema de control se encarga de gobernar dichas salidas a través de accionamientos. El sistema de control opera, en general, con magnitudes de baja potencia, señales, gobernando unos accionamientos que son los que realmente modulan la potencia entregada al sistema, según sea necesario.

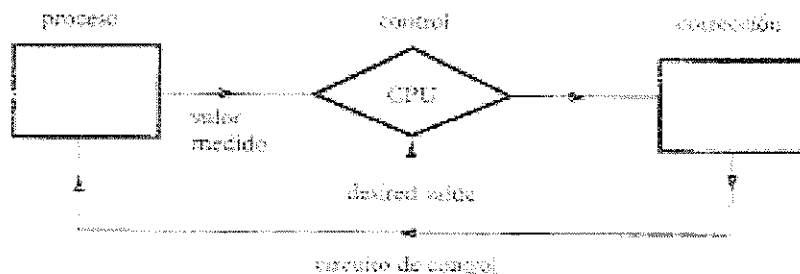
El conjunto del sistema de control y accionamientos se limitaría a ser un convertidor amplificador de potencia que ejecuta las órdenes dadas a través de las magnitudes de referencia. Este tipo de sistemas de control se denomina de lazo abierto, por el hecho de que no recibe ningún tipo de información del comportamiento del sistema.

Lo comúnmente esperado, es que el sistema de control se encargue de la toma de ciertas decisiones, ante determinados comportamientos del sistema, hablándose entonces de sistemas automáticos de control. Para ello se requiere la existencia de unos sensores que detecten el comportamiento de dicho sistema y de unas interfaces para adaptar las señales de los sensores a las entradas del sistema de control.



Este tipo de sistemas se denominan en lazo cerrado, ya que su diagrama muestra claramente una estructura con una cadena directa y un retorno o retroalimentación, formando el circuito de control.

Figura 4. Diagrama de un sistema de control en lazo cerrado



Fuente: José Rafael Granados Góchez, **Introducción al Control Industrial con Autómatas Programables PLC**, pag 77

Así pues en el caso más general, podemos dividir el sistema de control en los siguientes bloques:

- Unidad de control
- Accionamientos
- Sensores
- Interfaces

El papel del PLC dentro del sistema de control es la unidad de control, aunque suele incluir también, total o parcialmente, las interfaces con las señales del proceso. Al conjunto de señales de consigna y de retroalimentación que entran a la unidad de control se les denomina entradas y al conjunto de señales obtenidas se les denomina salidas.

### **3.1.2 Alarma**

El mejor modo de describir una alarma o detección es como una señal que avisa que se ha detectado el valor límite, es decir, que en el proceso se ha sobrepasado una cantidad predeterminada, como puede ser un nivel o un valor de la presión, o que ésta no se ha alcanzado. Comúnmente, la salida o procesamiento de una alarma de nivel o, en términos prácticos, un interruptor de nivel, es una salida digital del PLC, es decir la alarma sólo puede tener dos estados, activada (conectado) y desactivada (desconectada), bit 1 ó 0 respectivamente.

### **3.1.3 Control**

En el caso más simple, un dispositivo de control es una alarma con una gran histéresis de conmutación. Esto significa que a partir de la medición de un cierto valor empieza un proceso y, por la histéresis de conmutación, termina cuando se mide un segundo valor. Existen métodos de control que no suelen ser fiables excepto en aquellos instrumentos que se han diseñado específicamente para que tengan una histéresis de conmutación ajustable. A menudo, los puntos de activación y desactivación están demasiado próximos, y ello produce una forma de control ultrasensible.

Un ejemplo de este método de control podría ser un interruptor de nivel de sondas gemelas, una de control de nivel bajo y otra de control de nivel alto, al activarse el interruptor de nivel bajo el depósito recibirá producto hasta que sea activado el interruptor de nivel alto, sin embargo, si el producto se encuentra con un flujo intermitente al llenar el depósito se activaría el interruptor de nivel alto y se desactivaría repetidas veces lo que hace ineficiente el sistema ya que este interruptor sufriría un desgaste considerable.

### 3.1.4 Indicaciones

Una indicación es la determinación exacta del valor de una cantidad en cualquier momento del proceso. Evidentemente, sólo se pueden obtener mediciones dentro del rango del instrumento relevante. Existen dos sistemas de indicación los cuales son:

- **Sistemas de indicación directa:** funcionan por medios mecánicos como podría ser un interruptor, un resorte, una compuerta de paso, etc.
- **Sistemas de indicación indirecta:** funcionamiento controlado por medio de un PLC utilizando sus entradas o salidas analógicas de 0-20 ó 4-20 mA. Los indicadores de nivel más modernos orientados a bus utilizan sólo salidas digitales de señal.

Los instrumentos de control sólo pueden hacer mediciones dentro de un rango específico. Se puede poner un control de ganancia variable para disminuir la gama de intensidades empleada para el fondo de escala y comúnmente la gama de intensidades se puede desplazar por todo el campo de medida.

### **3.2 Principios de medición**

Se dispone de una amplia gama de técnicas de medición y, por ello, no siempre resulta fácil para el usuario seleccionar el método de obtención de lecturas de nivel que se adapte mejor a sus requerimientos específicos. Antes de la llegada de la tecnología de semiconductores, la mayoría de los métodos se basaban en principios mecánicos y/o neumáticos. Los principios de medición de nivel se basan en métodos completamente mecánicos, en la actualidad se usan sistemas completamente electrónicos, sin embargo, por factor económico y de simplicidad se encuentran en muchos lugares una mezcla que produce los métodos electromecánicos, los métodos anteriores se describen a continuación:

#### **3.2.1 Métodos mecánicos**

Las mediciones de nivel se basan en estos métodos que son simples y de un costo relativamente barato, pero con inconvenientes muy grandes, ya que son inapropiados para procesos industriales y no permiten la retransmisión de la información, no disponen de salidas electrónicas, requieren el empleo de escaleras y no son apropiados para muchos tipos de aplicaciones como por ejemplo recipientes o depósitos que son completamente sellados, poseen un mal funcionamiento en caso de adherencias de material y no son a prueba de fallos, por estas razones no son confiables para la industria. Los métodos mecánicos básicos son:

### **3.2.1.1 Método de mirilla de nivel**

Con este método se puede obtener una indicación visual del nivel en líquidos, razonablemente limpios cuando parte del depósito o recipiente está fabricado con algún material transparente. Si se monta una mirilla de nivel en una tubería de derivación con llaves de paso en cada extremo para aislarla del tanque principal, esta mirilla de nivel se puede retirar para ser limpiada, etc. Hoy en día quedan muy pocos ejemplos de este tipo de nivel en procesos industriales.

- Ventajas: sencillo y relativamente barato.
- Inconvenientes: poco apropiado para procesos industriales.

### **3.2.1.2 Método de barra calibrada**

Este es un método manual muy simple igualmente aplicable a líquidos y a sólidos granulados. En silos muy altos se emplean flejes de acero con un contrapeso en su extremo para esta medición. La aplicación más familiar de una barra calibrada es la varilla empleada para comprobar el nivel de aceite de un motor de automóvil.

- Ventajas: sencillo y de bajo costo.
- Inconvenientes: no se puede usar en procesos industriales, requiere el empleo de escaleras en depósitos o silos grandes y no es apropiado para muchas aplicaciones, como los recipientes a alta presión.

### **3.2.1.3 Interruptor de flotador**

El interruptor de nivel más conocido y simple consiste en un cuerpo flotante montado sobre un brazo móvil y acoplado mecánicamente a un interruptor externo al proceso. También hay versiones que consisten en un flotador redondo con un pequeño imán que sube a lo largo de un tubo, el mejor ejemplo de este método de medición es el flotador del depósito de agua de un retrete.

- Ventajas: relativamente sencillo, adecuado para muchos productos y de bajo coste.
- Inconvenientes: requiere un cierto montaje, mal funcionamiento en caso de adherencias de material y no es a prueba de fallos.

### **3.2.1.4 Método de flotador/cuerda**

La forma más simple de un sistema mecánico de flotador para medición de niveles consiste en un flotador, un cable fino, dos agarres y un peso suspendido en la parte exterior del tanque abierto. En la parte exterior del tanque se coloca una escala graduada y la posición del peso a lo largo de la escala indica el nivel del contenido del tanque. Este dispositivo no suele ser adecuado para aplicaciones en proceso. Por las características en cuanto a su montaje en tanques sellados, lectura y precisión, los sistemas industriales que emplean el sistema de flotador son buenos ejemplos de ingeniería mecánica y los convierte en los sistemas de medición más precisos para aplicaciones con silos o tolvas de almacenamiento muy grandes.

- Ventajas: relativamente sencillos, adecuados para diversos productos y muy precisos.
- Inconvenientes: requiere cierta cantidad de equipamiento mecánico.

### **3.2.1.5 Método por desplazamiento**

El método por desplazamiento de un cuerpo se basa en la diferencia entre el peso del cuerpo y la fuerza de flotación hacia arriba que el medio ejerce sobre el cuerpo de desplazamiento. La fuerza de flotación hacia arriba depende del volumen del cuerpo de desplazamiento, la densidad relativa y el nivel del medio. Obviamente, para que el cuerpo se desplace, debe ser más pesado que el medio. La fuerza diferencial se transmite frecuentemente a un transductor de medición por un sistema de barra de torsión de modo que el equipo se mantenga sellado. El cuerpo de desplazamiento se monta en un tubo de derivación, de modo que la calibración y control resultan ser independientes del proceso implicado. Además, el nivel del producto es más estable en el tubo de derivación, y se consigue que la medición no resulte supersensitiva.

- Ventajas: precisión.
- Inconvenientes: comúnmente no es utilizado en sólidos, depende de la densidad relativa y requiere una cantidad importante de equipamiento mecánico.

### **3.2.2 Métodos electromecánicos**

Las mediciones de nivel de métodos electromecánicos como su nombre lo indica, es un conjunto de medición mecánica con actuadores eléctricos son de costo relativamente barato, de medición confiable, utilizado la mayoría de las veces en sólidos, tienen inconvenientes menores que los métodos mecánicos ya que son restringidos para ciertos procesos industriales como por ejemplo, la medición de nivel de un tanque que contiene gasolina o una tolva que almacena carbón. Permite la retransmisión de información y funcionan en un sistema de control de lazo cerrado, pero aún no disponen de salidas electrónicas y requieren el empleo de escaleras no siendo apropiados para muchos tipos de aplicaciones (recipientes o depósitos que son completamente sellados), poseen un mal funcionamiento en caso de adherencias de material y no son a prueba de fallos, por estas razones no son confiables para la industria. Entre los métodos de medición electromecánicos podemos mencionar: los interruptores de nivel de paleta rotativa para áridos, sistemas electromecánicos de pesa de plomada para áridos y control de tanques de almacenamiento. Los métodos anteriores son explicados en el siguiente capítulo de forma amplia.

### **3.2.3 Métodos electrónicos**

Las mediciones de nivel de métodos electrónicos son de tipo más confiable que las anteriores, pero relativamente de costo más elevado, trabajan con sistemas de control de lazo cerrado y no poseen actuadores mecánicos o eléctricos, tienen la capacidad de trabajar en cualquier silo o tolva de almacenaje ya sean sellados, presurizados o abiertos, así como son capaces de tomar lecturas en cualquier tipo de producto sea sólido o líquido, sin embargo, sus características de selección lo hacen más complejo de utilizar dependiendo del producto con el que se trabaje.



Estos sensores son dispositivos creados para la medición de nivel en procesos industriales y de muy pocos inconvenientes ya que son bastante confiables y exactos, posee salidas electrónicas que pueden ser señales de entrada hacia un PLC de control que procesará los datos y retorna señales y niveles de alarma para un control confiable, ya que permiten la retransmisión de información. Entre los métodos de medición electrónicos se puede mencionar: medidores de nivel por presión hidrostática, medición de nivel por ultrasonidos, medición de nivel por microondas, medición radiométrica de niveles.

### **3.3 Utilización de símbolos**

El conocimiento de los símbolos empleados es esencial para una comunicación significativa y para la realización de diagramas de flujo de procesos. El símbolo básico empleado para indicar un instrumento es un círculo. La función del instrumento se indica mediante dos o tres letras situadas dentro del círculo. Comúnmente en los diagramas se añade dos cifras al código de letras generales para indicar la posición del equipo y el número de serie del instrumento, este código de letras está diseñado para identificar características esenciales y requerimientos de medición del instrumento y del proceso, de esta manera se define el código de letras de la siguiente manera:

#### **3.3.1 Parámetros de análisis**

Es la primera parte del código y representa la variable del producto que está en análisis, como excepción a ser la primera parte del código puede estar precedida por la letra **H**, del inglés *High* que significa alto, o de la letra **L**, del inglés *Low* que significa bajo, el código es de la siguiente forma:

<b>Código</b>	<b>Parámetro</b>
F	Caudal
L	Nivel
P	Presión
Q	Calidad
R	Radiación
S	Velocidad
T	Temperatura
U	Desplazamiento mecánico o tamaño
W	Peso
X	Otros Parámetros

De la misma manera, el símbolo que representa a las variables del producto puede estar seguido de letras auxiliares minúsculas correspondientes a una función de medición al código del parámetro de análisis, estas son las siguientes:

<b>Código</b>	<b>Función de medición</b>
d	Diferencia
r	Cociente
q	Cantidad

El parámetro de análisis va relacionado directamente con las variables del producto, las cuales son seleccionadas según el proceso industrial al que se desea tomar una lectura de nivel, entre estas variables se puede encontrar densidad, composición, contenido de humedad, etc.

### 3.3.2 Función de conversión de parámetros de análisis

Es la segunda parte del código representada también por una letra mayúscula que representa los requerimientos que debe tener el instrumento para la medición de cualquier nivel, en otras palabras se puede decir que representa la acción que toma el sensor de nivel (suma, indica, registra, etc.) en el punto de medición del proceso (caudal, presión, nivel, etc.).

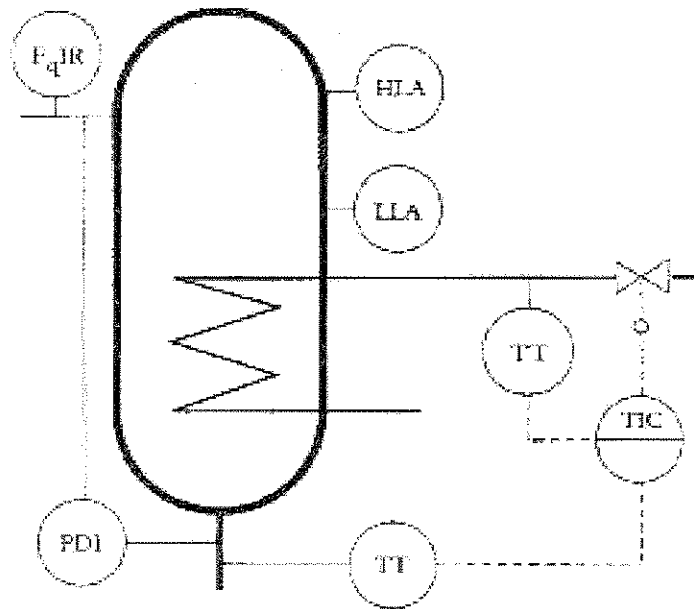
Debe estar claro que un símbolo representa sólo un parámetro, pero puede tener más de una función de conversión, por lo cual se puede añadir una tercera y cuarta letras. El código para las funciones de conversión es el siguiente:

<b>Código</b>	<b>Parámetro</b>
I	Indicación
R	Registrar
C	Controlar
T	Transmitir
S	Sumar
X	Convertir a otras funciones
A	Alarma

El código de función de conversión puede ir seguido de las letras **SD**, del inglés *Shut Down* que significa paro, cuando un instrumento o parte de su función se localiza en una sala de control, se indica subrayando las letras dentro del círculo.

En el diagrama unifilar o de flujo el símbolo básico va conectado siempre al punto de medición que se encuentra sobre la línea gruesa que representa el proceso mediante una línea delgada y también puede estar conectado a otros símbolos mediante una línea discontinua, además de los símbolos empleados en los diagramas de flujo, se han desarrollado otros símbolos para indicar la función y las conexiones del instrumento. Aunque muchos de estos símbolos están estandarizados según el estándar industrial, muchos de ellos son únicos para una rama específica de la industria.

Figura 5. Símbolos utilizados para la medición de nivel en un silo de almacenaje



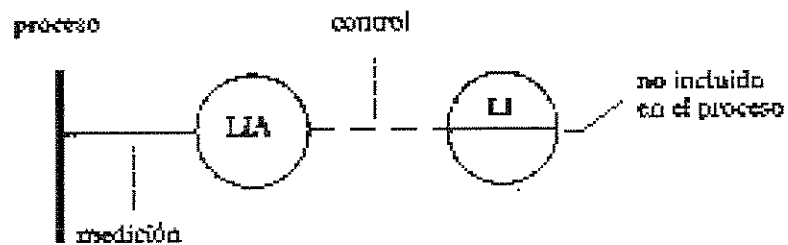
Fuente: Endress + Hauser, **Level Measurement**, [www.es.endress.com](http://www.es.endress.com)

De la figura 5 se puede tomar ejemplos de la interpretación de los símbolos, de esta forma se tiene:

<b>Símbolo</b>	<b>Interpretación</b>
FqIR	Medición de la cantidad de caudal con indicación y registro
HLA	Alarma de nivel alto
LLA	Alarma de nivel bajo
TT	Transmisor de temperatura
TIC	Control de temperatura con indicación
PdI	Medición de presión diferencial con indicación

La figura 6 muestra la pantalla de alarmas representativa en un cuarto de control.

Figura 6. Diagrama unifilar utilizando los símbolos de medición de nivel



Fuente: Endress + Hauser, **Level Measurement**, [www.es.endress.com](http://www.es.endress.com)



## 4 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE NIVEL

La medición de nivel es el proceso de conocer la cantidad de producto (líquido o sólido), que se encuentra en un recipiente de almacenaje conocidos comúnmente como silos o tolvas de almacenajes, de modo que se dispone una amplia gama de técnicas de medición de nivel.

La medición de nivel se clasifica en:

- Medición de nivel: se conoce la cantidad de producto dentro de un silo o tolva de almacenaje de forma continua, es decir, el comportamiento del producto dentro de recipiente según sea agregado a él o consumido en una etapa posterior del proceso.
- Detección de nivel: en la detección se enfoca principalmente al punto máximo y mínimo de capacidad de material en un recipiente de almacenaje, es decir, indica cuando un recipiente está lleno o vacío y controla la etapa anterior del proceso para que no agregue más producto en caso que el recipiente esté lleno o detiene la etapa posterior en el caso que el recipiente se encuentre vacío.

## **4.1 Detección y medición de niveles por métodos electromecánicos**

Los sistemas de medición de niveles basados en las propiedades mecánicas del producto son los siguientes: interruptores de nivel de paleta rotativa, para sólidos, indicadores de nivel por pesa de plomada, para sólidos y los indicadores de nivel de flotador para tanques de almacenamiento.

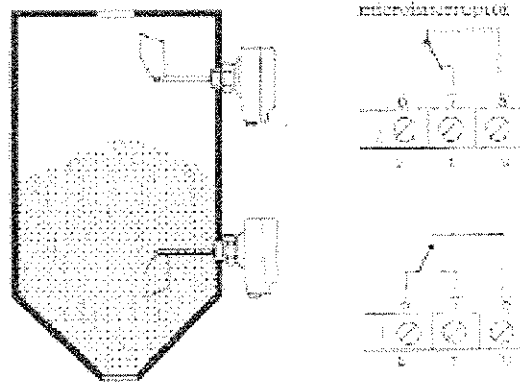
### **4.1.1 Interruptores de nivel de paleta rotativa para áridos**

El principio de este interruptor es el momento de inercia de una paleta rotativa, esto cambia según la forma en que gira si lo realiza en el aire o está en contacto con el producto, una paleta montada en un eje dentro del silo gira mediante un pequeño motor síncrono gracias a un mecanismo de engranajes reductores. El sistema de transmisión de la rotación montado sobre rodamientos se mueve cuando el producto ofrece resistencia al movimiento de la paleta y dos microinterruptores dispuestos para detectar este movimiento, entonces conmuta.

Cuando el mecanismo deja de ejercer resistencia sobre la paleta, el mecanismo regresa a su posición original; uno de los interruptores vuelve a poner en marcha el motor, y el otro indica el cambio de nivel, véase figura 7.



Figura 7. Interruptores de nivel de paleta rotativa, alto y bajo respectivamente para áridos



Fuente: Endress + Hauser, **Level Measurement**, [www.es.endress.com](http://www.es.endress.com)

Los interruptores de nivel por paleta rotativa se emplean en procesos sencillos y en casos en que se prevean adherencias del producto, puesto que este tipo de interruptores es insensible a las adherencias. Suelen estar montados horizontalmente en una de las paredes del silo a la altura del punto de interrupción. La paleta está diseñada de modo que permite el montaje desde el exterior del silo mediante una rosca. La paleta estándar puede ser demasiado pequeña si se emplea para productos livianos que no proporcionan suficiente resistencia, en estos casos se debe emplear una paleta proporcionalmente mayor, pero esta se debería montar desde el interior del silo, la entrada del producto no debe caer directamente sobre el eje, si se emplea como indicador de nivel mínimo, debe tenerse en cuenta la carga máxima que el eje puede soportar. Una solución adecuada a estos problemas podría ser incorporar una pantalla protectora encima de la paleta.

#### 4.1.2 Sistemas electromecánicos de pesa de plomada

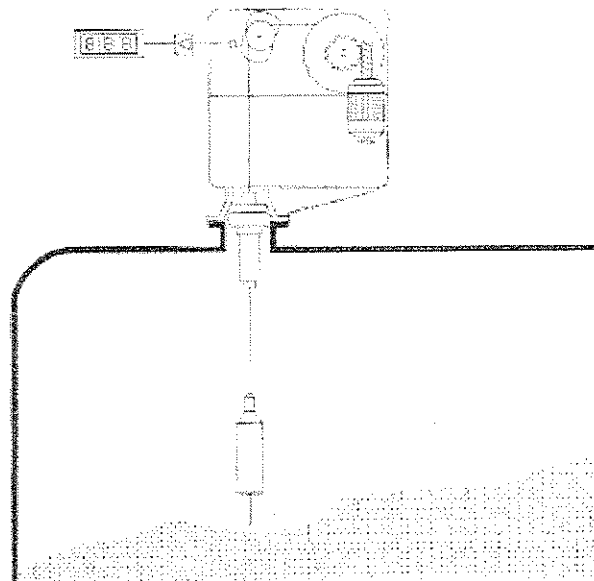
El principio de este sistema es: desde la parte superior de un silo se sondea la superficie del producto y se compara con la altura del silo. La diferencia es el nivel del producto. Este tipo de indicadores se conoce como *silopilots*.

Un *silopilot* consiste en un peso sensor que cuelga en el interior del silo de un cable enrollado a un tambor impulsado por un motor. Cuando el motor se arranca manual o automáticamente mediante un relé temporizador, un contador se pone a cero, que representa la altura total del silo en decímetros, centímetros, o metros. A medida que el motor hace descender el peso sensor, la rueda envía un impulso a través de la cuerda de medición por cada centímetro o decímetro bajado y éste se resta de la lectura del contador. Cuando el peso toca la superficie del producto, la cuerda se destensa, lo cual es detectado y el motor pasa a girar en sentido inverso, los impulsos dejan de enviarse y la cuerda se vuelve a enrollar en el tambor. Luego, el peso se queda en la parte superior del silo y el contador permanece con la última altura medida hasta que le llega una señal para que la medición se repita.

Los *silopilots* están diseñados para medir alturas de hasta 70 metros, existen también diversos tipos de pesos, de modo que se puede elegir el tipo más adecuado para cada aplicación. Incluso se puede elegir un flotador para indicación de nivel con líquidos en tanques altos. Una aplicación especial es la detección de sólidos debajo de líquidos. Esto se lleva a cabo con un peso sensor en forma de placa. La placa tiene agujeros para descender con facilidad por el líquido, pero flota sobre el sólido que haya bajo el líquido. Si además se dispone de un indicador de nivel por ultrasonidos, se pueden medir el nivel del líquido y el nivel de interfase del sólido.

Este tipo de mecanismos es particularmente adecuado para medición de niveles de materiales áridos y líquidos en silos y tolvas altas.

Figura 8. **Sistema electromecánico de pesa de plomada**



Fuente: José Rafael Granados Góchez, **Introducción al Control Industrial con Automatas Programables PLC**, pag 128.

### 4.1.3 Control de tanques de almacenamiento

El control de tanques es el nombre genérico para la valoración estática de productos líquidos en tanques de almacenamiento de áridos. Comúnmente se emplea la medición estática (el contenido del tanque) en lugar de la medición dinámica (cantidad de producto que ha entrado o salido del tanque). No es más que la determinación de la existencias en tanques de almacenamiento muy grandes. En muchos casos, las cantidades de producto en los tanques son estables y no se lleva a cabo ningún tipo de proceso.

El control del tanque es la valoración de la cantidad y se puede expresar en términos de volumen o de masa (peso). Independientemente del tipo que se emplee, es muy importante que proporcione fiabilidad y una precisión alta, especialmente si se van a usar como datos contables o fiscales, o en aplicaciones de pesos y medidas. Si se aplican las técnicas correctas, se consigue cumplir con estas condiciones. Sin embargo, para elegir una técnica de medición específica, se deben tener en cuenta el producto, el tipo de instalación (tipo de tanque) y los requisitos funcionales. El control de tanques de almacenamiento se realiza en general por medio de un servodispositivo de nivel o dispositivo electromecánico de nivel, este se introdujo en los años 50.

En el servodispositivo, el flotador se ha sustituido por un pequeño desplazador de unos 10 mm de diámetro, de densidad específica superior a la del producto. El motor de resorte se ha sustituido por un motor eléctrico controlado por un circuito de medición. La cuerda metálica se ha reemplazado por un hilo muy delgado, pero muy resistente, que se enrolla en un tambor de medición de alta precisión. El principio de medición se basa en la ley de Arquímedes y en el hecho de que el instrumento mide el peso aparente del desplazador.

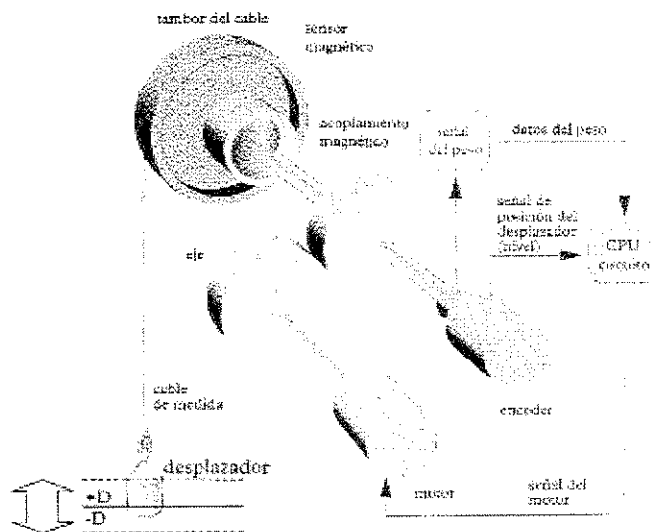
Si el peso aparente del desplazador es muy alto, el desplazador está muy arriba en el producto, y cuando el nivel baja, la fuerza ascendente que ejerce el producto sobre el desplazador es menos intensa. Si el desplazador pesa poco, se hunde mucho en el producto, y cuando el nivel sube, el producto ejerce sobre el desplazador una fuerza ascendente más intensa. El servomotor se basa en las diferencias de nivel y en la fuerza de flotación y se controla de modo que siempre haya una situación de equilibrio.

El hilo de medición se desenrolla o se enrolla en un tambor hecho con una gran precisión y va acoplado a un codificador mediante el cual se puede medir la posición del tambor.

Gracias a los dispositivos de control, se han minimizado los efectos de las influencias mecánicas como el rozamiento. Los servomecanismos han mejorado mucho desde sus inicios. El empleo de técnicas mediante microprocesadores han hecho posible corregir muchas influencias del entorno.

En la actualidad es posible compensar el efecto del peso del hilo de medición y la deformación del tanque debida a los efectos de la presión hidrostática y la temperatura.

Figura 9. Gráfica de un servomecanismo

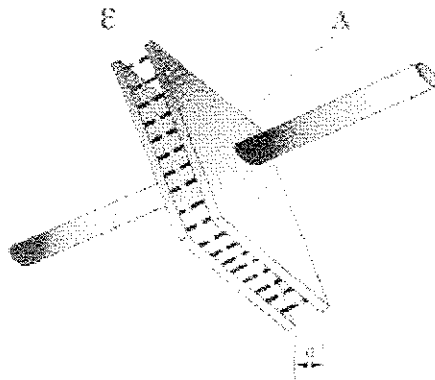


Fuente: José Rafael Granados Góchez, **Introducción al Control Industrial con Autómatas Programables PLC**, pag 96.

## 4.2 Detección y medición de niveles por capacidad

Este método se basa en la variación de la capacidad de un condensador. Un condensador es un componente eléctrico capaz de almacenar o descargar carga eléctrica. Un condensador sencillo consiste en dos placas eléctricas separadas por un material aislante que se conoce como dieléctrico.

Figura 10. Condensador sencillo



Fuente: Resnick, Física 2, pag 75

La capacidad de un condensador de placas paralelas viene dada por la fórmula siguiente:

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot 8.84 \cdot 10^2 \cdot A}{d} \quad (1)$$

donde

$C$  = capacidad del condensador en picofaradios (pF)

$A$  = área de la superficie de las placas en cm

$d$  = distancia entre las placas en cm.

$\epsilon_r$  = permitividad relativa del medio dieléctrico

La constante dieléctrica del material es un indicador del incremento de capacidad cuando, para una diferencia de potencial dada entre las placas del condensador, se añade material polarizable. Por definición, la constante relativa del aire es 1. Cualquier otro material tiene una  $\epsilon_r$  mayor que 1.

La ecuación (1) muestra que para cualquier condensador en que  $d$  y  $A$  sean constantes, el valor  $C$  de la capacidad dependerá sólo de  $\epsilon_r$ . En la práctica, para la medición de niveles, el condensador está formado por la pared metálica del tanque, silo, tolva, etc., y una sonda aislada montada en el interior del silo o tolva. Los silos con paredes conductoras no presentan problemas. Por ejemplo, en alcantarillas de hormigón armado, la armadura metálica es adecuada para actuar como una de las placas del condensador. Para silos o tolvas de plástico se puede emplear un tubo metálico o un enrejado colocado alrededor de la sonda, o una tira metálica en la parte exterior. Dado que todos los productos tienen un valor  $\epsilon_r$  mayor que el aire ( $\epsilon_r=1$ ), el valor de la capacidad del sistema será siempre superior cuando la sonda esté completamente cubierta por el producto que cuando sólo esté parcialmente cubierta o totalmente al descubierto. La medición de nivel por capacidad se basa en este cambio en la capacidad  $\Delta C$ . El condensador se conecta a un circuito de corriente alterna de alta frecuencia, de modo que el cambio en la capacidad  $\Delta C$ , que es el cambio de nivel, se puede convertir en señal eléctrica.

Un condensador en un circuito de corriente continua tiene una resistencia infinita, mientras que en un circuito de corriente alterna tiene un tipo de resistencia conocido como reactancia.

$$R_c = \frac{1}{\omega C} \quad (2)$$

donde:

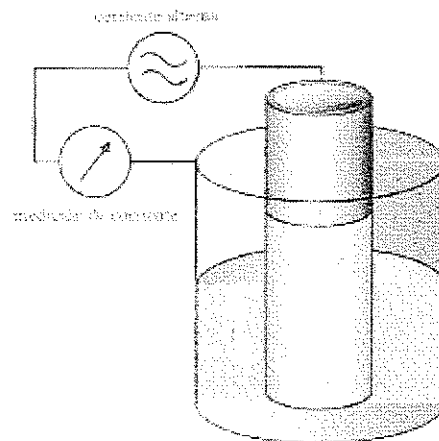
$R_c$  = reactancia capacitiva (tipo resistencia)

$\omega = 2 \pi f$  ( $f$ = frecuencia de la tensión alterna)

$C$ = capacidad

La figura 11 muestra un condensador conectado a una fuente de corriente alterna, conocido como oscilador de alta frecuencia. La corriente que pasa por el circuito es directamente proporcional al valor  $C$  de la capacidad.

Figura 11. **Condensador conectado a una fuente de corriente alterna**



Fuente: Resnick, **Física 2**, pag 93



Un oscilador colocado en el cabezal de la sonda convierte los cambios de capacidad en variaciones de voltaje o de frecuencia. De este modo, se evita tener el circuito de alta frecuencia más tiempo del necesario y se elimina la necesidad del cable coaxial. Esta variación de voltaje de aproximadamente 3-12 V, o de frecuencia, de alrededor de 150-400 Hz, se puede transmitir fácilmente por cable estándar de cobre a un amplificador de voltaje remoto, que puede estar situado a una distancia de hasta un kilómetro. Allí, la variación de voltaje  $\Delta U$  o la variación de frecuencia  $\Delta f$  se convierte mediante un relé en un interruptor de capacidad o en un indicador de nivel por capacidad estándar de señal de 0-20 ó 4-20mA, esta señal puede ser procesada por un PLC.

#### 4.2.1 Detección de nivel por capacidad

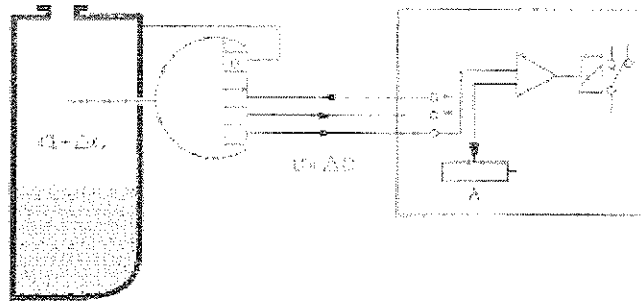
Detección de nivel significa detectar que en un punto determinado se ha alcanzado ese nivel. Consta básicamente de los componentes siguientes:

- Sonda de medición
- Oscilador de alta frecuencia
- Amplificador con señal de salida

Actualmente muchos interruptores de capacidad son de tipo compacto, es decir, incorporan los 3 componentes en una unidad.

Uno de los métodos de detección de nivel por capacidad consiste en convertir el cambio de capacidad  $\Delta C$ , en una variación de tensión  $\Delta U$ . El principio se ilustra en la figura 12.

Figura 12. Conversión de cambio de capacidad en una variación de tensión



Fuente: Morris A. S., *Principles of measurement and instrumentation*, pag 258

El oscilador se conecta al amplificador con un cable de tres hilos. Dos de los hilos proporcionan la fuente de alimentación al oscilador, y el tercero se emplea como señal, es decir, da el cambio en la diferencia de potencial  $\Delta U$  que luego el amplificador convierte en una acción de relé. Las capacidades iniciales de distintos dispositivos de medición nunca son las mismas. Cuando la sonda está al descubierto, el oscilador genera una señal  $U$ , cuyo valor depende de la capacidad en vacío, o capacidad inicial,  $C_i$ . El Potenciómetro  $A$  se emplea para ajustar el amplificador de modo que esté no activo. Cuando la sonda está cubierta, la capacidad aumenta a un valor  $C_i + \Delta C$ , y la diferencia de potencial resulta  $U + \Delta U$ . Este cambio en la diferencia de potencial pasa por el amplificador y el relé se activa.

#### 4.2.2 Indicación de nivel por capacidad

La indicación de nivel por capacidad hace referencia a la medición continua del nivel de producto en un silo o tolva de almacenaje de producto.

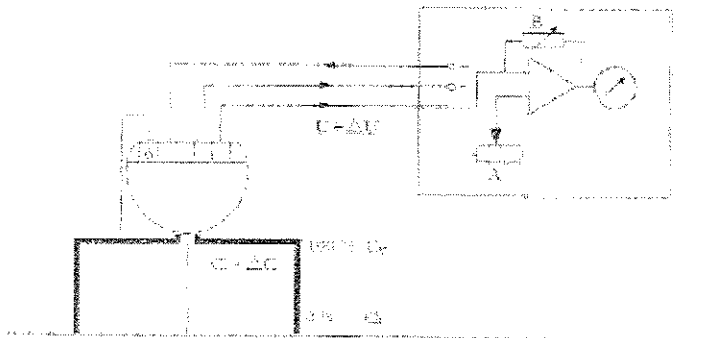
El sistema de medición comprende los siguientes componentes:

- Sonda
- Oscilador de alta frecuencia
- Amplificador con salida analógica de corriente (4 – 20 mA) y /o salida de voltaje

Actualmente también hay indicadores de capacidad en versión compacta, es decir, incorporan los 3 componentes en una unidad.

Igual que en la detección de nivel por capacidad, en un indicador de nivel los cambios en la capacidad ( $\Delta C$ ) también se convierten en una variación de potencial  $\Delta U$  como se puede observar en la figura 13.

Figura 13. Cambio de capacidad en variación de potencial



Fuente: Morris A. S., **Principles of measurement and instrumentation**, pag 287

El valor de la tensión  $U$  depende de la capacidad en vacío, o capacidad inicial,  $C_i$ , del sistema de medición. El valor inicial o valor “en vacío” se establece con el potenciómetro A y se ajusta el amplificador a 0% para un  $C_i$  dado. Cuando el tanque o silo se llena, la capacidad inicial  $C_a$  pasa a ser  $C_a + \Delta C$  y el nuevo voltaje es  $U + \Delta U$ . Este cambio en el valor del voltaje  $\Delta U$  se amplifica y se convierte en una señal estándar de 4-20 mA. El potenciómetro B se emplea para el ajuste del valor de fondo de escala correspondiente al 100% (20mA) del valor de la señal.

### 4.3 Medición de nivel por presión hidrostática

Este método se basa en la medición de la presión hidrostática correspondiente a una columna de líquido de una altura determinada. La presión se calcula mediante la expresión  $P = h \cdot \rho \cdot g$ , donde:

P = presión

h = altura de la columna de líquido

g = aceleración de la gravedad (constante en un lugar determinado)

$\rho$  = densidad relativa

A partir de la fórmula se observa que si la densidad efectiva del medio es constante, la única variable es h. Así, pues, la presión es directamente proporcional a la altura h, es decir, al nivel del líquido en el tanque.

Figura 14. Medición de nivel por presión hidrostática

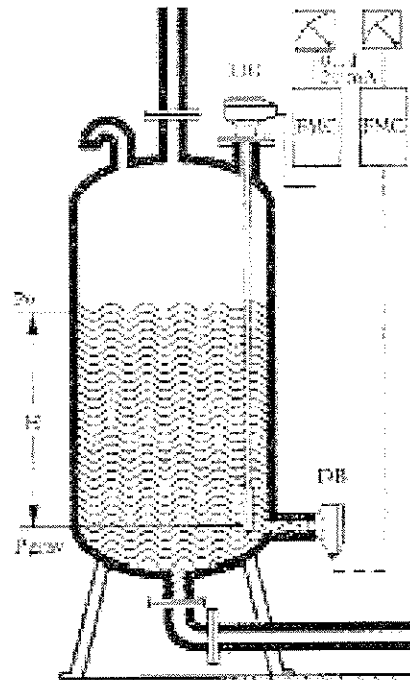
$$H = \frac{P}{\rho \cdot g}$$

H = altura del líquido  
P = presión hidrostática  
 $\rho$  = densidad del producto  
g = aceleración de la gravedad

Donde:  $P = P_{grav} + P_0$

$P_{grav}$  = presión hidrostática de la columna de líquido  
 $P_0$  = presión estática  
= 0 para tanques abiertos

1 bar =  $10^5$  Pa = 10 m columna de agua



Fuente: A-B levels fundamentals, **Basics Mechanics**, [www.ab.com](http://www.ab.com)

El esquema también permite observar que la presión medida es igual a la presión de la columna del líquido más la presión en la superficie.

En tanques abiertos expuestos a la atmósfera se establece que la presión en la superficie del líquido es cero. La presión en la superficie suele ser despreciable porque la mayoría de sensores de presión disponen de dispositivos que compensan la presión atmosférica. Si la presión en la superficie del líquido es mayor que la presión atmosférica (silos y tolvas cerradas), se puede emplear un sensor de presión diferencial.

Entonces, la presión total medida es mayor que la correspondiente a la columna de líquido en un tanque abierto. En este caso, se resta de la presión total, la que actúa en la superficie, y queda la presión correspondiente a la columna de líquido.

#### **4.4 Detección y medición de niveles por ultrasonidos**

El ultrasonido es una vibración mecánica con un rango de frecuencia mayor al audible por el oído humano que es transmitida a través de un medio físico, es orientado, registrado y medido en hertz, el rango utilizado se denomina ultrasónico (20KHz en adelante).

La detección y medición de nivel por ultrasonidos es una técnica que utiliza ondas sonoras para tomar referencia de posición de un producto en silos y tolvas de almacenaje. Debido a que utiliza ondas sonoras en lugar de radiaciones, el ultrasonido es un método seguro de medición y detección.

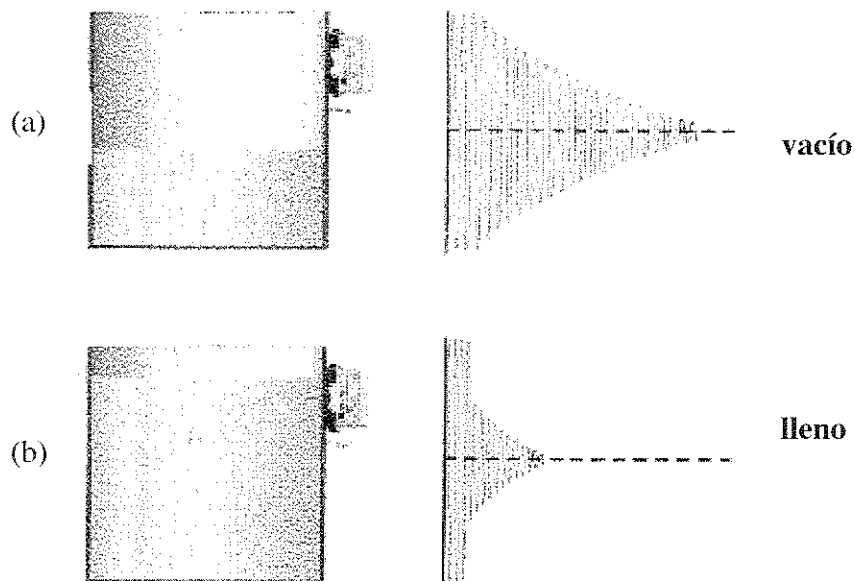
La detección y medición de nivel por ultrasonidos se basa en el rebote de ondas sonoras sobre el cuerpo o material en medición. Los ecos producidos por estas ondas se convierten en una distancia el cual es procesado por el sensor de nivel, esta técnica de detección y medición es llamada también como sonar.

#### **4.4.1 Detección de niveles por ultrasonidos**

La detección de niveles por ultrasonidos mide la diferencia entre los tiempos de resonancia de una señal de sonido emitida desde un sensor montado en la pared de un silo o tolva de almacenaje y la misma señal recibida de vuelta por el mismo sensor.

El sensor, que está ajustado acústicamente respecto a la pared de un contenedor de líquido (tanque, silo, tolva, tubo o recipiente), genera un corto impulso de ultrasonidos que se mantiene en resonancia localmente respecto a la pared. Las frecuencias de resonancia son distintas dependiendo de que exista o no líquido directamente bajo el sensor. El sensor detecta la diferencia de tiempos de resonancia correspondientes a un recipiente vacío y uno lleno y activa una señal de salida, las señales detectadas son mostradas en la figura 15.

Figura 15. **Detección de señales de nivel**



Fuente: Endress + Hauser, **Level Measurement** ,[www.es.endress.com](http://www.es.endress.com)

Cuando se monta el sensor, se ajusta a una longitud de onda adecuada para que entre en resonancia respecto a la pared cuando el recipiente está vacío. El mismo procedimiento se lleva a cabo cuando el recipiente se llena y cubre de líquido el punto bajo el que el instrumento está instalado.

Las dos frecuencias de resonancia se almacenan en el instrumento y automáticamente se genera un punto de conmutación entre ambas. Si el valor entre las dos frecuencias es aceptable, la unidad pasa directamente al modo de funcionamiento. Si los valores son incorrectos, el sistema pasa al modo de alarma. Se debe tener en cuenta que el material, el montaje y el grosor de la pared imponen restricciones. Se admiten todas las paredes de metal, vidrio y plástico de un grosor entre aproximadamente 2 y 12 mm. Por otra parte, debido a la rigidez de las tuberías, el diámetro mínimo debe ser por lo menos de 200 mm. El sensor de nivel por ultrasonidos se conecta con un interruptor de nivel



independiente. La señal es del tipo especificado de modo que el sensor se puede montar en una zona de riesgo, es de vital importancia tener en cuenta que antes de montar el sensor, la superficie se debe lubricar con una pasta que optimice el acoplamiento acústico para el buen funcionamiento del mismo.

#### **4.4.1.1 Aplicaciones**

Las aplicación más común de este método es donde se requiere una medición no invasiva, ya sea porque el producto pueda contaminar, o ser venenoso, corrosivo o no homogéneo. A continuación se mencionan algunos ejemplos típicos:

- Detección de niveles en recipientes ya probados.
- Detección en recipientes que contengan ácidos o detergentes de limpieza concentrados.
- Protectores de bombas en vacío para tubos de diámetro superior a los 200 mm.
- Detección de niveles en situaciones que requieren que no haya contacto con el producto, como por ejemplo en la industria farmacéutica o en biotecnología.
- En recipientes de vidrio o con revestimiento de vidrio que no permitan el montaje de los instrumentos habituales.

El funcionamiento después de montado es sumamente sencillo, consiste simplemente en apretar un botón en situación de pared seca y pulsarlo de nuevo en situación de pared con líquido. El microprocesador almacena las dos frecuencias de resonancia y genera automáticamente un punto de conmutación

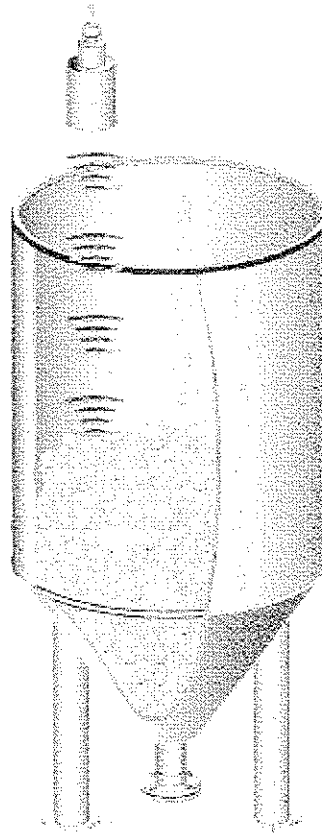
entre ambas. Debido a que la frecuencia de resonancia es distinta en cada punto, si se modifica el punto de instalación, se debe repetir el ajuste.

#### **4.4.2 Medición de niveles por ultrasonidos (tiempo de retorno de la señal)**

Los métodos de medición de niveles por ultrasonidos se basan en la medición del tiempo de retorno de una señal acústica emitida por un sensor que se refleja en la superficie del líquido o sólido y es recibida de vuelta por el mismo sensor, véase la figura 16.

El tiempo de retorno de un impulso de ultrasonidos es una medida directa de la altura del producto en un silo o tolva de almacenaje, ya que la distancia en metros que recorre el impulso es igual al tiempo de viaje en segundos multiplicado por la velocidad del sonido en metros por segundo. La velocidad de los ultrasonidos es de aproximadamente 331 m/s en aire a 0°C, y es independiente de la frecuencia y de la presión del aire. Sin embargo, sí depende de la temperatura del aire, por lo que se debe aplicar un factor de corrección de 0.17% por cada °C de incremento de temperatura en todos los sistemas.

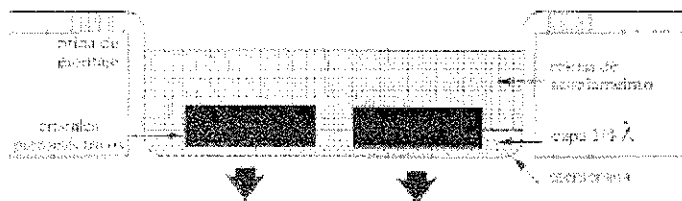
Figura 16. **Medición de nivel por ultrasonidos, método de retorno de la señal**



Fuente: Endress + Hauser, **Level Measurement**, [www.es.endress.com](http://www.es.endress.com)

El sistema de medición consiste en un emisor o sensor montado en la tolva o silo y un amplificador de medición remoto instalado, por ejemplo, en la sala de control o de mando. El amplificador genera una señal de salida de 4-20 mA proporcional al nivel, aunque de hecho se mide la altura de espacio vacío, en vez de la altura del producto. El sensor en sí consiste en una membrana conectada a uno o más cristales piezoeléctricos que transmite y recibe la señal sonora, véase figura 17.

Figura 17. Membrana de sensor de nivel por ultrasonidos



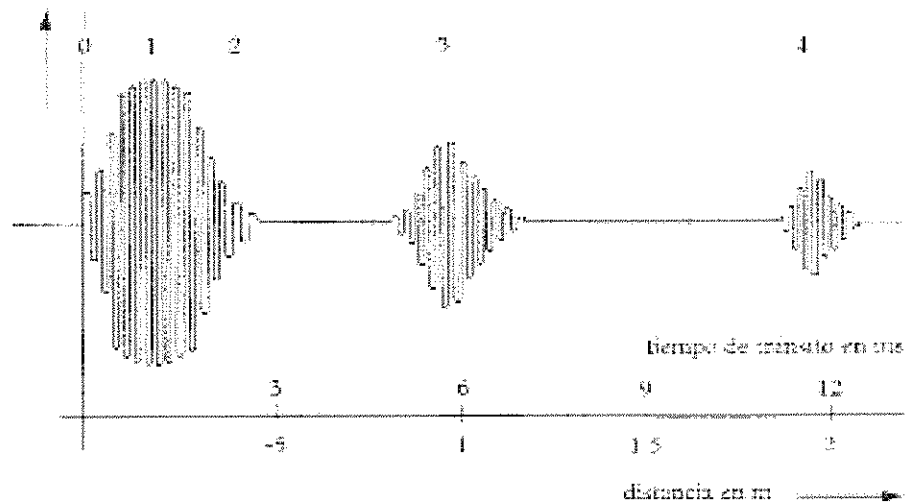
Fuente: Endress + Hauser, **Level Measurement**, [www.es.endress.com](http://www.es.endress.com)

Cuando se someten a energía eléctrica, los cristales piezoeléctricos generan una débil vibración mecánica que la membrana convierte en señal acústica. De modo análogo, la onda sonora reflejada origina una vibración mecánica en el cristal que se convierte en una débil señal eléctrica (el impulso de retorno). La diferencia de tiempos entre la transmisión de la señal original y la recepción de la señal de retorno es el tiempo de retorno, es decir, el tiempo que tarda la señal en recorrer dos veces la altura de la parte vacía de la tolva o silo.

Si el sensor de nivel se conecta a un osciloscopio se podría captar la imagen de la figura 18.

En el punto 0, cuando se somete el cristal piezoeléctrico a corriente alterna se genera un impulso de sonido y el sistema empieza a vibrar a la frecuencia de resonancia. El impulso original tiene una vibración de aproximadamente 2 ms y la frecuencia de transmisión está entre los 13 y los 4 kHz, según el tipo de transductor o sensor.

Figura 18. Conexión de sensor de nivel a un osciloscopio



Fuente: Endress + Hauser, **Level Measurement**, [www.es.endress.com](http://www.es.endress.com)

En el punto 1 es el final del impulso de sonido. En este punto, las vibraciones de la membrana se empiezan a amortiguar como consecuencia del rozamiento. Esta fase dura aproximadamente 1ms, tras la cual el dispositivo vuelve a estar listo para que la membrana y los cristales piezoeléctricos reciban la señal de retorno (eco).

En el punto 2, el impulso de ultrasonidos, tras 3ms en este ejemplo, ha recorrido una distancia de aproximadamente 1 m ( $2 \times 0.5$  m). Esto significa que el sensor puede determinar distancias a una superficie reflectora no más cercana a 0.5 metros. Esta distancia se denomina distancia de bloqueo. La distancia mínima de bloqueo está entre los 0.3 y los 1.2 m, según el tipo y el campo de medida del sensor.

En el punto 3, la señal de retorno se recibe, en este ejemplo, 6 ms más tarde, después de recorrer una distancia total de 2 m, de modo que el nivel está a 1 m del sensor.

En el punto 4, pasados 6 ms, se recibe una segunda señal de eco o, en ciertas circunstancias favorables, incluso un eco múltiple, puesto que el segundo eco siempre es más débil que el primero y se recibe más tarde, no se incluye en el proceso de medición.

La frecuencia del impulso emitido se determina por la distancia máxima que se va a medir. Para una distancia máxima de 20 m, la distancia total que recorre el sonido es de 40 m. De esta manera tenemos:

$$Tiempo\_retorno\_de\_señal = \frac{Dis\ tan\ cia}{Velocidad} = \frac{40}{331m/s} = aprox.1.8s \quad (3)$$

Es decir, en este ejemplo, la frecuencia del impulso transmitido puede ser de 8 Hz. En la práctica, se emplea una frecuencia de 2-10 Hz, según cuál sea la distancia máxima que se va a medir.

Un amplificador por ultrasonidos se puede comparar con un cronógrafo sofisticado que convierte el tiempo entre la emisión del impulso y la recepción del eco en una señal de salida estándar. Además de la información sobre el tiempo que tarda (es decir, la distancia que hay) desde el sensor hasta la superficie donde se refleja, el sensor informa al transmisor acerca del tipo de sensor, la banda de amplificación y la temperatura. La información de la distancia se analiza estadísticamente, con lo que los ecos falsos provocados por mezcladores o por material cayendo, no distorsionarán la evaluación del eco verdadero.

#### 4.4.2.1 Supresión de ecos falsos

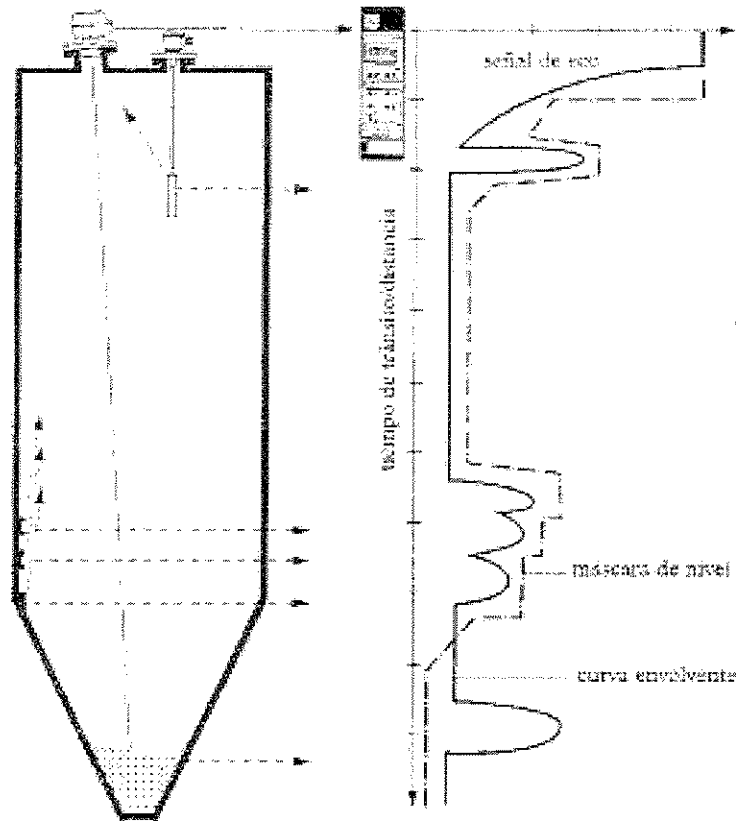
Cuando se emplean ultrasonidos para la medición de niveles, puede suceder que la señal se refleje en tubuladuras, otros sensores de medición, refuerzos de la estructura o costuras de soldadura. Los falsos ecos se pueden eliminar para evitar falsas interpretaciones. Eliminar, significa que el microprocesador puede elevar uno o más puntos fijos el umbral de detección, llamado UFT o umbral función del tiempo (véase figura 19).

Si la señal reflejada es lo bastante fuerte, el transmisor podrá seguir la señal verdadera de eco también con ese umbral de detección elevado. Si la señal de eco está por debajo del umbral de detección, el transmisor busca alrededor de ese umbral y retiene la salida hasta que la señal reaparezca.

Este eco de interferencia se puede eliminar de dos modos:

- Punto por punto (máx. 10) – El sistema mide una distancia del sensor a un punto de reflexión erróneo porque el tanque o silo está vacío o el nivel es muy bajo y da valores erróneos. Este eco de interferencia se elimina pulsando un botón, y el amplificador busca un nuevo nivel de reflexión.

Figura 19. Umbral función del tiempo



Fuente: Endress + Hauser, **Level Measurement**, [www.es.endress.com](http://www.es.endress.com)

- Automáticamente – se debe llevar a cabo cuando el nivel del producto es bajo. Se puede medir a mano la distancia entre el sensor y el nivel hasta un nivel tan bajo como sea posible con este método, y al pulsar un botón, el sistema mismo detectará e interpretará todas las demás señales de eco entre el sensor y este eco como ecos de interferencia y las eliminándolas.



### 4.4.3 Aplicaciones

Los sistemas de medición por ultrasonidos se pueden emplear para una gran variedad de aplicaciones, desde cambios en el nivel del agua de menos de 10 ó 15 cm para mediciones de caudal en cauces abiertos hasta la determinación de la cantidad de carbón o caliza en un silo de 60 m de profundidad. Es evidente que con tal variedad de aplicaciones, se requieren distintos tipos de sensores y de los correspondientes amplificadores. El aspecto más relevante para la medición cuando se quiere detectar pequeñas variaciones de nivel en la superficie de un líquido en calma es la precisión, mientras que si se pretende medir distancias largas en condiciones desfavorables (ruido, polvo, entrada de flujos, interferencias y otros factores perjudiciales), lo primero que hay que exigir es un alto grado de fiabilidad en la medición.

El sistema debe ser capaz de proporcionar resultados fiables incluso en condiciones críticas. Un sistema de medición de amplificadores exige la utilización de una extensa gama de filtros de selección, comprobadores de la integridad del eco y elementos que distingan entre el eco en sí y la frecuente presencia de ruido industrial.

Las propiedades únicas de estos sistemas los convierte en los dispositivos ideales para el control de bombas en alcantarillas altamente contaminadas o en estaciones de bombeo. Es más, el hecho de que el sistema no entre en contacto con el producto representa una gran ventaja cuando se emplea en tanques que contienen productos pegajosos muy viscosos como colas, aceites, grasas, lodos, pintura, etc.

En la industria química puede encontrar otras aplicaciones con lodos corrosivos en tanques de mezclado, celulosa noble en la industria papelera, granulados plásticos en silos y en cubas de plantas de tratamiento de aguas.

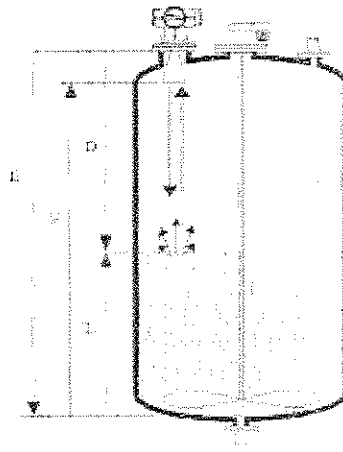
#### **4.5 Medición de Niveles por microondas**

La medición del tiempo de retorno de un impulso de microondas permite determinar el nivel de una tolva o silo. Con productos líquidos, una antena o antena de trompeta, se emiten y reciben los impulsos de microondas, mientras que para productos sólidos, un cable sonda guía los impulsos de microondas. Las microondas u ondas de radar (*Radio Detecting And Ranging*, detección y localización por radio) se emplea en la aviación, la marina y en aplicaciones militares.

##### **4.5.1 Medición de niveles por microondas en líquidos**

El transmisor de nivel *Micropilot* funciona según el principio del eco, el cual se ha tocado ampliamente en la detección y medición por ultrasonidos. Una antena de varilla o una antena de trompeta dirige impulsos cortos de microondas de 0.8 ns de duración hacia el producto, éstos se reflejan en su superficie, y la misma antena los detecta a su regreso, esta vez, actuando como receptor.

Figura 20. Medición de nivel por microondas en líquidos



Fuente: Endress + Hauser, **Level Measurement**, [www.es.endress.com](http://www.es.endress.com)

La distancia a la superficie del producto es proporcional al tiempo de retorno del impulso de microondas:

$$D = c \cdot t / 2 \quad (4)$$

D : Distancia del transmisor/superficie del producto

c: Velocidad de la luz

t: Tiempo de tránsito en segundos

El nivel L es la altura total del tanque vacío, E, menos la distancia medida, D:  $L = E - D$ . El nivel L se puede medir hasta justo por debajo de la antena de varilla o la antena de trompeta, de modo que no hay restricciones por distancia. Este instrumento, conocido como *Micropilot*, opera en la banda de frecuencias para aplicaciones industriales, científicas y médicas, o banda ISM (por sus siglas en inglés: *Industrial, Scientific and Medicals*) entre los 6 GHz a 26 GHz.

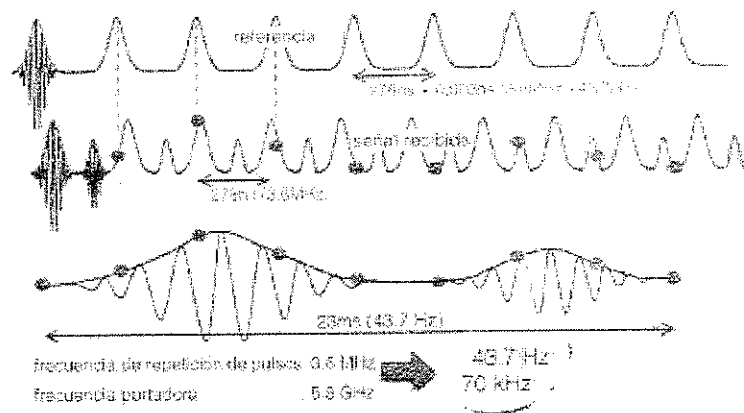
Su baja potencia de radiación permite una instalación segura en recipientes metálicos y no metálicos, sin riesgos para los seres humanos o el entorno. La medición de niveles por microondas es virtualmente independiente de la temperatura, de condiciones de altas presiones o vacío, y de la presencia de polvo o vapor. Los impulsos de microondas viajan a la velocidad de la luz y no se ven afectadas por la presencia de vapor.

En la medición de niveles por ultrasonidos, los impulsos de onda sonoros se generan mecánicamente mediante vibraciones del aire, y se reflejan debido a las propiedades mecánicas del medio. En cambio, la medición por microondas consiste en la radiación electromagnética que se refleja debido a una variación en la impedancia (es decir, un cambio de la constante dieléctrica del medio en que se refleja.) La constante dieléctrica  $\epsilon_r$  del producto debe tener un valor mínimo. Los valores de  $\epsilon_r$  deben estar por encima de 1.4 para aplicaciones en tubos tranquilizadores, o de 1.9 en cualquier otro caso. Por encima de estos valores, los cambios en  $\epsilon_r$  no afectan a la medición. Para productos conductores mayor a 10 mS/cm, la medición resulta totalmente independiente de  $\epsilon_r$ .

La aplicación práctica y procesamiento de la señal se hace con un oscilador de alta frecuencia (HF, por sus siglas en inglés *High Frequency*) que genera una señal de microondas básica de 6 GHz, un generador de impulsos de onda que genera una frecuencia de 3.6 MHz transmite por la antena la alta frecuencia original. La señal se refleja en el producto y regresa de nuevo al receptor por la antena. Luego, la señal recibida y la señal de referencia, con la misma pulsación de 3.6 MHz, pero reducida en 43.7 Hz, se envían a un mezclador de frecuencias.

Cuando el impulso de referencia se mezcla con el transmitido (incluyendo el pulso reflejado), la señal aumenta en un factor de 82.380, con lo que se obtiene un impulso de muestra de 43.7 Hz ( $=3.6 \text{ MHz}/82.380$ ) con una frecuencia portadora de 70 kHz ( $= 6 \text{ GHz}/82.380$ ). esta señal de muestra, de frecuencia más baja y más fácil de manejar, tiene la misma forma y contiene la misma información de reflexión que la señal original transmitida, véase la figura 21.

Figura 21. **Comportamiento según el método de retorno de microondas**



Fuente: John. D. Krauss, **Electromagnetismo con aplicaciones**, pag 360

Después de procesar la señal, sólo 44 curvas por segundo se emplean para los análisis estadísticos y se convierten en una señal de salida. La calidad de la señal de microondas reflejada puede depender de la cantidad y del tipo de espuma presente. Si la espuma es densa y conductora, la reflexión se producirá en la espuma, en vez de en la superficie del producto. Si, por el contrario, la espuma es no conductora y no demasiado espesa, la señal aún se reflejará en la superficie del producto. El empleo de agitadores o la existencia de olas reduce la amplitud de la señal reflejada, si ésta era suficiente.

Un indicador de nivel por microondas es una medición por tiempo de retorno de las ondas y, por ello, no depende de la amplitud de la señal de retorno.

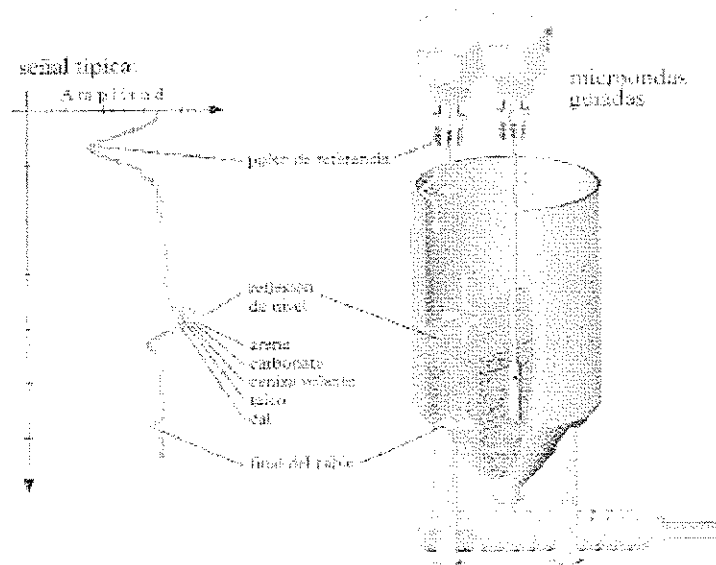
#### 4.5.2 Medición de niveles por microondas en sólidos

La industria de telecomunicaciones por cable desarrolló el principio de la medición de niveles por microondas guiadas, o TDR (*Time Domain Reflectometry*, reflectometría de dominio del tiempo) para detectar una rotura en su extensa red de cable. Cuando se transmite un impulso de radar por el cable, el tiempo que la señal de retorno necesita para su recorrido, varía debido a que el circuito abierto o cortocircuitado presenta impedancias diferentes (es decir, por la distancia). Actualmente, este método se emplea para la medición de niveles en presencia de grandes cantidades de polvo, porque los instrumentos de medición por ultrasonidos pueden fallar debido a un elevado contenido de polvo y los indicadores de nivel de sondeo por microondas libres tampoco pueden usarse debido a que los sólidos secos no reflejan la energía emitida.

La tecnología TDR difiere de la del radar convencional en que los impulsos de microondas se emiten en una amplia banda de frecuencias (200 kHz hasta 1.2 GHz). La tecnología TDR emplea microimpulsos electromagnéticos que viajan por cable (ondas guiadas) y se reflejan debido a un cambio súbito en la constante dieléctrica. En medición de niveles, el cambio en el valor de la constante dieléctrica se corresponde con la interfase aire/producto. La distancia  $D$  a la superficie del producto es proporcional al tiempo de retorno del impulso,  $D = c \times t/2$ , donde  $c$  es la velocidad de propagación. Es importante el hecho de que la potencia de los impulsos emitidos es muy baja (menos de 1 microwatio) y que están guiados, por lo que apenas se disipa energía.

Por este motivo, la intensidad (amplitud) de la señal que retorna será casi la misma si el nivel del producto está entre 3 m y 10 m de la parte superior del recipiente.

Figura 22. **Medición de nivel por microondas en sólidos**

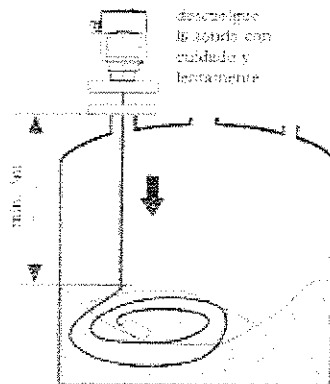


Fuente: Endress + Hauser, **Level Measurement**, [www.es.endress.com](http://www.es.endress.com)

Así como en la medición por ultrasonidos y por microondas se emplea el método de la curva envolvente, en la técnica de medición TDR cada cable sonda se representa por 512 puntos digitales, independientemente de la longitud de éste. Se recoge una muestra del comportamiento de los impulsos reflejados en cada punto de la sonda y la información acumulada sobre el ciclo de muestreo se procesa y se convierte en información acerca del nivel del producto. El principio del tiempo de retorno de las microondas guiadas se emplea en indicadores de nivel para sólidos de hasta 20 m y se conoce con el nombre de Levelflex.

La baja potencia de la energía de radar permite su instalación segura en contenedores y silos tanto no metálicos como metálicos sin riesgos para los seres humanos ni el entorno. No se requiere ningún tipo de licencias para su instalación. Otra diferencia entre los indicadores de nivel por microondas en espacio abierto y los instrumentos por TDR es que, en los primeros, la misma estructura, otros posibles montajes en el silo y el extremo del cable sonda también detectan y se devuelven más impulsos que propiamente el nivel del producto. Por esta razón se lleva a cabo el llamado “mapa sonda” que confirma que el impulso recibido es el del nivel del producto.

**Figura 23. Representación gráfica del “Mapa sonda”, estimado del comportamiento del material dentro del silo o tolva de almacenaje**



Fuente: Endress + Hauser, **Level Measurement**, [www.es.endress.com](http://www.es.endress.com)

Este mapeado se efectúa generalmente en la fábrica para las longitudes de la sonda especificada y sólo es necesario en caso de montajes especiales o de reducción de longitud de la sonda.



Los instrumentos de medición de nivel por microondas guiadas sirven para una amplia variedad de sólidos de hasta un tamaño de grano de 20 mm y con valores de la constante dieléctrica de 1.8 ó superiores. No se ven afectados por la humedad, ni por los cambios en la composición, ni por la presión o la temperatura. La presencia de grandes cantidades de polvo, vapor, adherencias, ruido acústico o el ángulo de talud del producto tampoco afectan a la medición.

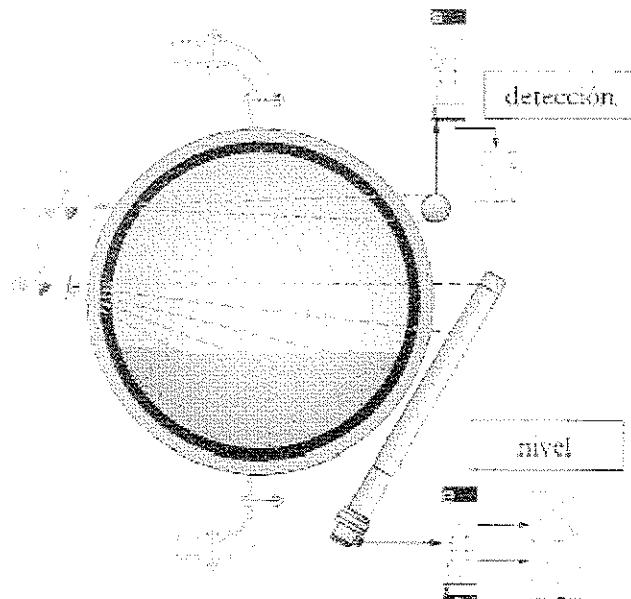
Los instrumentos de medición de nivel por microondas guiadas se emplean en todo tipo de silos y tolvas de almacenaje que contengan áridos o materiales brutos cuyo tamaño de los granos no sobrepase los 20 mm y el campo de medida no exceda a los 20 m. Incluso en materiales pulverulentos como ceniza volante y cemento así como granos, granulados o copos, estos instrumentos dan un buen resultado aunque el producto tenga una constante dieléctrica tan baja como 1.8. Incluso en silos altos y delgados o en silos de formas especiales con travesaños u obstáculos, estos indicadores de nivel proporcionan una medición fiable.

#### **4.6 Medición y detección radiométrica de niveles**

Cuando hay producto en el silo o tolva de almacenaje, un haz de rayos gamma que lo atraviese se atenúa. Este es el único método totalmente no invasivo. Ningún elemento del sistema entra en contacto con el medio ni con la atmósfera del proceso, una fuente de rayos gamma dentro de un contenedor emite un haz con un ángulo de salida de aproximadamente  $5^\circ$  ( o  $20^\circ$  ó  $40^\circ$ , para indicación de nivel). En el extremo opuesto de la fuente se dispone un detector de rayos gamma conectado eléctricamente con un interruptor de nivel o con un transmisor de nivel que proporciona una señal de salida.

La intensidad de la fuente de radiación está calculada de modo que cuando el silo está vacío, el detector transmite justamente los pulsos necesarios para que el amplificador interruptor de nivel o el indicador de nivel procesen una señal. A medida que el nivel del producto aumenta, la radiación se atenúa, el detector deja de transmitir suficientes pulsos y el instrumento indica nivel alto, de modo que el sistema constituye un indicador de nivel o un interruptor de nivel que no entra en contacto con el producto y que es externo al tanque o reactor, sin que sea necesario ningún tipo de modificación de éstos.

Figura 24. **Medición y detección radiométrica de niveles**



Fuente: Endress + Hauser, **Level Measurement**, [www.es.endress.com](http://www.es.endress.com)

Los sistemas de medición de niveles por radiación gamma se emplean en situaciones donde las sondas u otros tipos de transmisores no se pueden instalar dentro del tanque o silo debido a:

- Productos muy corrosivos o extremadamente adherentes
- En reactores u hornos a presiones y/o temperaturas muy elevadas
- Con materiales granulados gruesos o áridos abrasivos tales como menas de mineral, calizas y carbones minerales.

La radiación gamma no se emplea sólo en detección e indicación de niveles, sino que, como la atenuación de la energía emitida depende de la densidad del material atenuante, este principio de medición también se puede emplear para la medición de la densidad del producto y para la medición de la interface. Por supuesto, en el último caso, entre los dos materiales debe haber una diferencia de densidades apreciable.

Hay tres tipos de radiación nuclear, que son capaces de penetrar la materia: rayos alfa, beta y gamma. Los rayos gamma tienen el mayor poder de penetración y, al contrario que los rayos alfa y beta, no se ven afectados por campos eléctricos o magnéticos, de modo que, idealmente, la radiación gamma cumple los requisitos para ser un instrumento de medición de niveles o de medición de densidades nuclear. Los rayos gamma son un tipo de radiación electromagnética que determinados elementos emiten como resultado de transiciones entre estados energéticos del núcleo del átomo. Esta técnica de medición emplea solamente fuentes de radiación gamma o isótopos producidos artificialmente. La radiación emitida es de una longitud de onda muy corta, del orden de  $10^{-10}$  a  $10^{-13}$  m, con una energía de entre 0.66 y 2.5 Joules.

Lo anterior permite traspasar las paredes del recipiente. La medición de niveles radiométrica se basa precisamente en esta propiedad.

#### **4.6.1 Definición y unidades de medida**

##### **4.6.1.3 Actividad (Ci) (Bq)**

La intensidad de una fuente de radiación se mide en Curies (Ci) o Bequerels (Bq). 1 Curie =  $3.7 \times 10^{10}$  Bequerels. Las actividades de las fuentes empleadas en la medición de niveles suelen estar entre los 100 microcuries y los 500 millicuries.

##### **4.6.1.2 Dosis y dosis equivalente**

El Gray se utiliza para medir dosis radiada o absorbida. Una dosis absorbida de 1 Gray (Gy) corresponde a una transferencia de energía al material de 1 J/Kg, expresado en unidades del sistema internacional. Sin embargo, para tener una idea más cercana de los efectos de la radiación, se emplea otra unidad, la dosis equivalente, medida en Sievert. Según el tipo de radiación, se usa un factor de conversión para determinar la dosis en tejidos biológicos. Para la radiación gamma, este factor de conversión, es igual a 1.

#### **4.6.1.3 Intensidad de radiación o tasa de exposición (Sv/h)**

La tasa de exposición se mide en Sievert por hora y es la cantidad de Sievert a la cual el cuerpo está expuesto, medida a una distancia determinada de la fuente de radiación. Esta intensidad de radiación local es un factor importante cuando se emplea radiación gamma para medición o detección de niveles.

#### **4.6.1.4 Tiempo de vida media ( $t_{1/2}$ )**

Todas las sustancias radiactivas experimenta un proceso natural de decaimiento, de modo que su actividad disminuye con el tiempo. La vida media de una sustancia radiactiva es el tiempo que debe transcurrir para que su actividad disminuya a la mitad. El cobalto 60 tiene una vida media de 5.3 años, es decir que, para que su actividad alcance el 50% de su valor original, tardará 5.3 años. Las fuentes radiactivas con vidas medias más largas emiten radiación de menor energía. Es más fácil apantallarlas, pero tiene un poder de penetración inferior, por lo tanto, se requieren actividades mayores. Las fuentes de radiación gamma con vidas medias más cortas emiten radiación de energía más alta, la necesaria pantalla protectora debe ser más gruesa y más pesada, y en consecuencia, más cara; pero el poder de penetración es mucho mayor y las actividades que se requieren, inferiores.

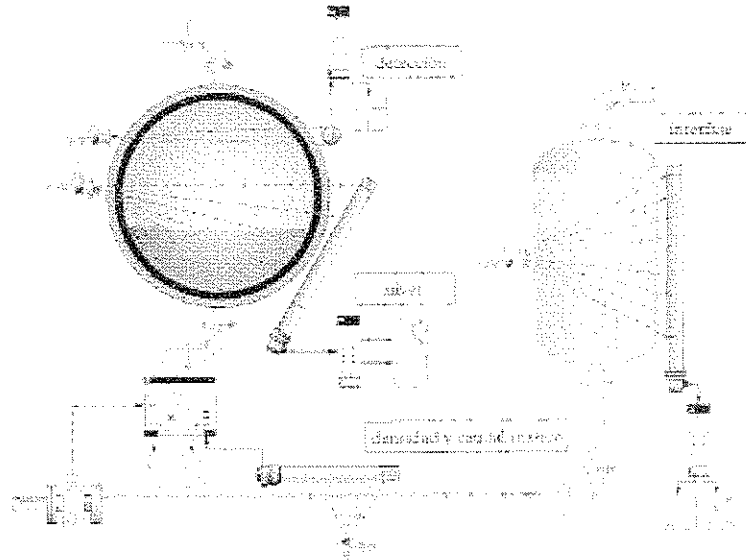
#### **4.6.2 Componentes de un sistema de medición de niveles nucleares**

Todos los sistemas de medición de niveles nucleares constan de los componentes siguientes:

- Una o más fuentes radiactivas, entre estos podría mencionarse al cobalto y cesio empleados principalmente en procesos industriales.
- Uno o más contenedores de fuentes radiactivas, es el dispositivo que guarda a la fuente radioactiva.
- Uno o más detectores, captan la radiación.
- Un interruptor electrónico o unidad de medición, el cual realiza el trabajo de procesamiento de datos que entrega el detector.

Estos componentes se pueden apreciar en la figura 25.

Figura 25. Componentes de un sistema de medición de niveles nuclear



Fuente: Endress + Hauser, **Level Measurement**, [www.es.endress.com](http://www.es.endress.com)

### 4.6.3 Cálculo de la actividad de la fuente

El cálculo de la actividad de la fuente depende de los factores siguientes:

- Aplicación, es decir: interruptor de nivel, indicador de nivel o medición de densidad y tiempo de respuesta requerido.
- Tipo de detector y longitud del detector.
- Distancia entre el detector y el soporte de la fuente, material de la pared y espesor.

Una vez calculada la actividad de la fuente requerida, se debe elegir el contenedor correspondiente. Los criterios para elegir el contenedor de la fuente dependen de los niveles de radiación que se consideren aceptables a su alrededor. Estos valores son diferentes en Europa, América y Asia.

El montaje de los sistemas de medición nucleares es inmediato, puesto que se pueden montar fuera del tanque o reactor. Sin embargo, el soporte de la fuente y el lado opuesto, donde se situará el detector, deben estar alineados de modo que el detector reciba la señal de radiación.



## **5 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE SENSORES DE NIVEL**

Para la selección de un nivel adecuado a un proceso industrial se deben tomar en cuenta muchos factores relacionados con el proceso, en la práctica, el principio de elección óptimo para un proceso específico se podrá decidir rápidamente mediante un proceso de eliminación por la experiencia adquirida y porque se sabrá responder las preguntas adecuadas, es importante tomar en cuenta que el presente trabajo presenta los criterios de selección basados en el proceso, sin embargo, es de vital importancia tomar en cuenta el factor económico ya que es indispensable y no es tomado en cuenta en el presente, este criterio se encuentra definido por la calidad del proceso, proveedor del producto y casa distribuidora del mismo.

### **5.1 Criterios del producto de almacenaje**

Los criterios se encuentran enfocados en el producto a almacenar en silos y tolvas, y se encuentran divididos en requerimientos de monitoreo, datos básicos del producto, variables del producto las cuales se encuentran amarradas al proceso industrial y datos del respectivo proceso industrial.

### **5.1.1 Requerimientos del producto**

Los requerimientos del producto representan que es lo que se desea conocer acerca del producto almacenado, es decir, en un silo de almacenaje, se necesita obtener indicaciones de nivel del silo, medición constante del mismo así como un sistema de control ya sea de lazo abierto o lazo cerrado según sea la necesidad del proceso, estos requerimientos generalmente son planteados por las personas encargadas de la optimización del proceso industrial.

### **5.1.2 Datos del producto**

Es indispensable conocer a qué se enfrenta para seleccionar de forma adecuada el medidor o detector de nivel, los datos del producto son la clave para el reconocimiento del dispositivo a utilizar. Aquí se define el producto, si es líquido corresponde viscosidad, peso específico, corrosividad; en el caso de los sólidos se debe definir si se midiran polvos, gránulos, o partículas y su tamaño, se realiza una selección del material y la clase de adherencia que podría tener el mismo al silo o a la tolva de almacenaje.

### **5.1.3 Variables del producto**

Estas son definidas por las personas encargadas del proceso industrial, generalmente personal de optimización de procesos, ellos definen constantes del producto y sus variables, en base a estas variables se conoce a groso modo el detector de nivel o medidor a utilizar, las variables más comunes en procesos industriales son: la constante dieléctrica, densidad, conductividad, composición y contenido de humedad.

#### **5.1.4 Datos del proceso**

Los datos del proceso se definen en forma puntual en el silo o tolva de almacenaje, estos son: presión, temperatura, método de instalación del medidor o detector de nivel, método de llenado del recipiente de almacenaje y de vital importancia la vibración a la cual se encuentra sometida el recipiente.

La tabla 3, muestra un resumen de los principios mencionados y la conveniencia de cada uno según la función deseada, las propiedades del producto y las condiciones del proceso.

### **5.2 Aspectos de seguridad en la medición de niveles**

El empleo de instrumentos modernos y equipos de control ha contribuido enormemente a reducir los riesgos en los procesos industriales. La mayor responsabilidad de empleados y público, las crecientes presiones por los aspectos medioambientales, el incremento del precio de las materias primas y los costes cada vez mayores de las interrupciones de producción no programadas, han revertido en los últimos años en una mayor fiabilidad y en severas exigencias de seguridad.

#### **5.2.1 Normas y estándares oficiales**

Los estándares oficiales obligan a los fabricantes a producir sus productos según un estándar específico. Estos estándares hacen referencia a aspectos tales como el aislamiento, las distancias entre conductores, las corrientes y los voltajes máximos, etc., para componentes específicos. Los estándares solían variar de un país a otro, pero actualmente se han introducido estándares europeos con la intención de estandarizar toda Euro.

Tabla II. Criterios de selección de sensor de nivel

	Tipo de medición		Propiedades del producto				Condiciones del proceso								
	líquido	materiales granulados	medición de nivel	detección de nivel	susceptible de producir espuma	viscosidad elevada	no homogéneo	corrosivo, acero inoxidable no resistente	granulado	partículas grandes	presión inferior a 0.5 bar	presión superior a 10 bar	temp. inferior a 60 Cent	temp. entre 50 y 100 C	temp. superior a 100 C
<b>Método visual</b>															
A. Vidrio transparente	G	P	G	L	L	G	G			G	L	G	G	L	
B. Barra calibrada	G	G	L	L	G	G	G			B	P	G	G	L	
Método de flotador	G	G	L	G	L	G	P			G	L	G	G	L	
Método por desplazamiento	G	G	L	G	L	P	P			G	G	G	G	G	
<b>Método de presión</b>															
A. Presión Hidrostática	G	G	L	G	P	L				G1	G1	G	G	L	
Método de Plomada	G	G	L	G	G	P	G	G	G	G	L	P	G	G	G
Método por capacidad	G	L	G	L	L	G	L	P	G	G	G	G	G	G	G
Absorción de la radiación gamma	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
Absorción/reflexión ondas sonoras	G	G	G	G	S	G	L	G	G	L	P	G	L	P	
Reflexión guiada de microondas	G	G	G	G	G	P	G	G	G	G	G	G	G	L	
Reflexión libre de las microondas en la antena	G	P	G	L	G	G	G			G	G	G	G	G	G

G=BUENO  
 L=CON LIMITACIONES  
 P=MALO  
 NOTA:  
 "Con limitaciones" también indica que no hay preferencias, mientras que una casilla en blanco significa que no es aplicable.

G1 Sólo con delta P

Cada fabricante debe ser capaz de establecer, por lo menos, con qué estándares se fabrica su producto.

## **5.2 Aspectos de seguridad en la medición de niveles**

El empleo de instrumentos modernos y equipos de control ha contribuido enormemente a reducir los riesgos en los procesos industriales. La mayor responsabilidad de empleados y público, las crecientes presiones por los aspectos medioambientales, el incremento del precio de las materias primas y los costes cada vez mayores de las interrupciones de producción no programadas, han revertido en los últimos años en una mayor fiabilidad y en severas exigencias de seguridad.

### **5.2.1 Normas y estándares oficiales**

Los estándares oficiales obligan a los fabricantes a producir sus productos según un estándar específico. Estos estándares hacen referencia a aspectos tales como el aislamiento, las distancias entre conductores, las corrientes y los voltajes máximos, etc., para componentes específicos. Los estándares solían variar de un país a otro, pero actualmente se han introducido estándares europeos con la intención de estandarizar toda Europa. Cada fabricante debe ser capaz de establecer, por lo menos, con qué estándares se fabrica su producto.

Muchos fabricantes aplican sus propios criterios de estandarización que superan los estándares que exige la industria. Estos estándares adicionales pueden referirse al empleo de los componentes de esa marca y a la disponibilidad de circuitos integrados y transistores.

El empleo de resistores de película metálica, condensadores de tantalio y contactos con baño de oro han aumentado la fidelidad de los equipos y los niveles de confianza.

Las verificaciones nacionales independientes y las organizaciones de certificación, certifican los equipos fabricados y también contribuyen a los estándares oficiales. Uno de los estándares más conocidos es el de la protección contra intrusión de material sólido y/o prevención de penetración de agua llamado comúnmente *Ingress Protection*.

### **5.2.2 Máximo y mínimo en la seguridad ante fallos**

En relación con los interruptores de nivel, este concepto se refiere a la elección de la dirección de conmutación del relé u otra señal de salida (o sea, la función de salida). La salida o relé se debe diseñar de forma que actúe de modo que en estado excitado esté en una situación de seguridad. Esto significa que para la indicación de nivel máximo el relé o salida estará en el estado excitado mientras el transductor no esté cubierto. Cuando el nivel aumente, el sistema de indicación de nivel conmutará y el relé se desexcitará. Ahora bien, si la fuente de alimentación falla o si el circuito de la bobina de relé se corta, el relé también se desexcita, de modo que siempre conmuta a una situación de seguridad.

Es lo mismo para una salida de indicación de nivel mínimo, la salida debe conmutar en la dirección opuesta, es decir, la situación es segura mientras el transductor está cubierto. Por ello, es esencial instalar los conmutadores de indicación de nivel máximo o mínimo con su correspondiente modo de seguridad.

Para ver como funciona una salida de indicador de nivel en el modo de seguridad seleccionado, se tomará siempre como referencia la situación de desconexión. La situación de falta de corriente tiene que coincidir con la de la reacción del sistema en caso de que éste tenga algún fallo.

Cuando circula corriente por el sistema, para decir que el relé está activo, es decir que la salida está alta, se suele emplear el término “excitado”. Sin embargo, el término puede llevar a confusiones cuando se aplica a detección de niveles, a menos que también se definan las situaciones para alarma de máximo y de mínimo.

A menudo, la opción de seguridad tiene la forma de unos interruptores de patilla programable en el circuito impreso de conmutación de nivel, o de un cable que hace un puente en la caja de interruptores. Cuando se cambia por fallo alguna parte del equipo, la función de seguridad permanece activa. En los interruptores de nivel modernos, que funcionan con microcomputadores, la función de seguridad se puede establecer por configuración. Para señalar las posiciones de relé y la indicación visual para ambos tipos de sistemas de seguridad ante fallos en la documentación del instrumentos. Se suele emplear un diagrama de funciones como el que se ilustra en la figura 26.

Figura 26. Diagrama de funciones de seguridad de máximos y mínimo

posición del interruptor	nivel	relé SPDT	transistor PNP	LED rojo de indicación	LED verde de funcionamiento
	onda cuadrada	relé no excitado	bloqueado		
seguridad de máxima	onda cuadrada	relé no excitado	conectado		
	onda cuadrada	relé excitado	conectado		
seguridad de mínima	onda cuadrada	relé no excitado	bloqueado		
	onda cuadrada	relé no excitado	bloqueado		

Fuente: Endress + Hauser, Level Measurement, [www.es.endress.com](http://www.es.endress.com)

### 5.2.3 Seguridad contra explosiones

En la mayoría de países se exige que los equipos eléctricos que operen en “entornos explosivos” (comúnmente llamada área EX), cumplan extensas reglamentaciones. Estas normativas pueden tener ámbitos estatales o incluso continentales, estas reglamentaciones se establecen para equipos eléctricos y mecánicos que operen en zonas con riesgo de explosión.



Dichas zonas se catalogan en divisiones o zonas según el riesgo de explosión y de formación de atmósferas explosivas.

Se puede producir una explosión o incendio cuando se cumplen las condiciones del triángulo del riesgo de ignición, se dan a la vez un medio inflamable, presencia de aire u oxígeno y una fuente de ignición. Para evitar explosiones o incendios, hay que prevenir alguno de estos tres elementos. Puesto que la presencia de aire y la del medio son inevitables, las medidas de prevención apuntan siempre a evitar las fuentes de ignición. Los medios inflamables se agrupan según su energía de ignición (grupos según los gases) y su temperatura de ignición (clases según la temperatura), mientras que la clasificación por áreas (zonas en Europa y divisiones en EEUU) se basa en y depende de los aspectos siguientes:

- La cantidad y el tipo de medios inflamables (líquidos, mezclas de gases y polvos).
- La presencia y la frecuencia de atmósferas explosivas potenciales.
- La existencia de ventilación natural o artificial.
- La posible pérdida por fugas de los medios inflamables.

La tabla 4 presenta las clases de equipos eléctricos según temperaturas y la tabla 5 presenta las características de algunos productos explosivos.

Tabla 4. Clases de equipos eléctricos según temperaturas

Clase de componente eléctrico	Temperatura superficial máxima del componente eléctrico (°C)	Temperatura de ignición del gas o vapor (°C)
T1	<150 - >300	>450
T2	<300 - >300	>300
T3	<200 - >135	>200
T4	<135 - >100	>135
T5	<100 - > 85	>100
T6	< 85	> 85

En Norteamérica, las categorías T2, T3 y T4 se dividen en subcategorías T2, T2A, T2 B, T2 C, T2D, T3, T3 A, T3B, T3C, T4, T4A.

Fuente: Endress + Hauser, **Level Measurement**, [www.es.endress.com](http://www.es.endress.com)

Tabla 5. Características de algunos productos explosivos

Sustancia	Temperatura de ignición (°C)	Clase según temperatura	Grupo según gas
Acetona $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ (2-propanone)	540	T1	IIA
Acetileno $\text{C}_2\text{H}_2$ (etino)	305	T0	IIIC
Anhidrido acético ( $\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O}$	330	T2	IIA
Benceno $\text{C}_6\text{H}_6$	555	T1	IIA
Butano $\text{C}_4\text{H}_{10}$	365	T2	IIA
n-butil alcohol $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$ (1-butanol)	340	T2	IIA
Cloruro de benceno $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	590	T1	IIA
Etilanol $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (etil-alcohol)	425	T2	IIA
Etil-acetato $\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$	460	T1	IIA
Metanol $\text{CH}_3\text{OH}$ (metil-alcohol)	455	T1	IIA
Nitrobenceno $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	430	T1	IIA
n-pentano $\text{C}_5\text{H}_{12}$	285	T3	IIA
Propano $\text{C}_3\text{H}_8$	470	T1	IIA
Tolueno $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$	535	T1	IIA
Hidrógeno $\text{H}_2$	560	T1	IIIC
Sulfuro de carbono $\text{CS}_2$	102	T5	IIIC
Acido sulfúrico $\text{H}_2\text{S}$	270	T3	IIIB

En Norteamérica, los grupos de gases también se pueden indicar como A, B, C y D, equivalentes a IIC, IIC, IIB y IIA.

Fuente: Endress + Hauser, **Level Measurement**, [www.es.endress.com](http://www.es.endress.com)

#### 5.2.4 Autoseguimiento de la seguridad

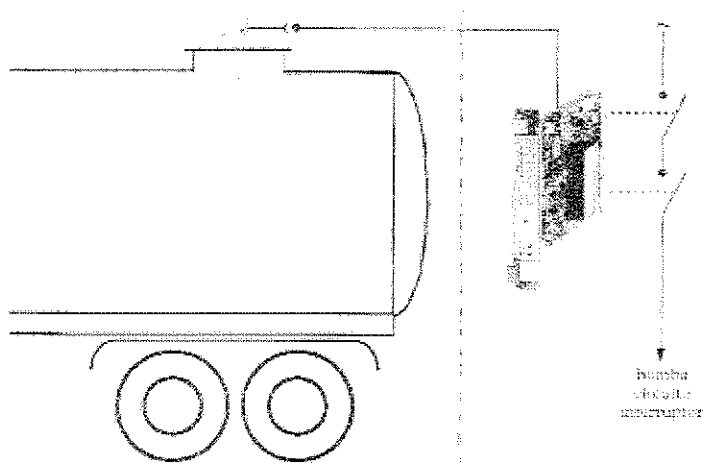
Las medidas de seguridad discutidas anteriormente se aplican a elementos de seguridad para sistemas de medición de niveles. Estos elementos suelen formar un autoseguimiento de la seguridad, que actúa como dispositivo de seguridad por sí mismo que asegura que el sistema funciona correctamente o activa una alarma cuando el sistema no funcione en forma correcta.

El empleo de los pulsos modulados en frecuencia (*Pulse Frequency Modulation*, por sus siglas en inglés PFM) permite mejorar notablemente la autoseguridad de un sistema.

La PFM cambia la frecuencia del tren de pulsos para transmitir una señal codificada; por ejemplo, en un indicador de nivel capacitivo, la modulación de la frecuencia del impulso se puede emplear para un autoseguimiento de la seguridad, de modo que la alarma se activa en los siguientes casos:

- Fallan o se retiran las electrónicas de la unidad del oscilador o del sensor.
- El cable a dos hilos que conecta el sensor y el conmutador de nivel está interrumpido, en cortocircuito o su polaridad está al revés.
- El circuito de entrada del conmutador de nivel está defectuoso.

Figura 27. Ejemplo de detector de nivel superior en un tanque con riesgo de revalse



Fuente: Endress + Hauser, **Level Measurement**, [www.es.endress.com](http://www.es.endress.com)

La figura 27 ilustra un ejemplo de un detector de límite superior en un tanque, en el cual se emplea un circuito interruptor de seguridad para impedir que el mecanismo de control de una bomba funcione, este tanque tiene riesgo de revalse si:

- No se efectúa o se interrumpe la conexión entre la sonda del tanque y el borne de carga.
- La sonda o el oscilador son defectuosos o no están.
- Se infiltra agua o cualquier otra sustancia en el extremo de la sonda.
- Se produce un defecto en el mismo interruptor de nivel.

El circuito de llenado también se interrumpe (ahora mediante el relé de salida del nivel) cuando se alcanza el nivel superior. El PFM puede ser utilizado para detectar cualquiera de las fallas anteriores, al ser detectada una falla se manda una señal de seguridad al interruptor del circuito de bomba el cual detendrá el flujo de líquido al tanque.

### **5.3 Caso práctico**

#### **5.3.1. Caso 1, sistema de medición de nivel por el método de retorno de ultrasonidos**

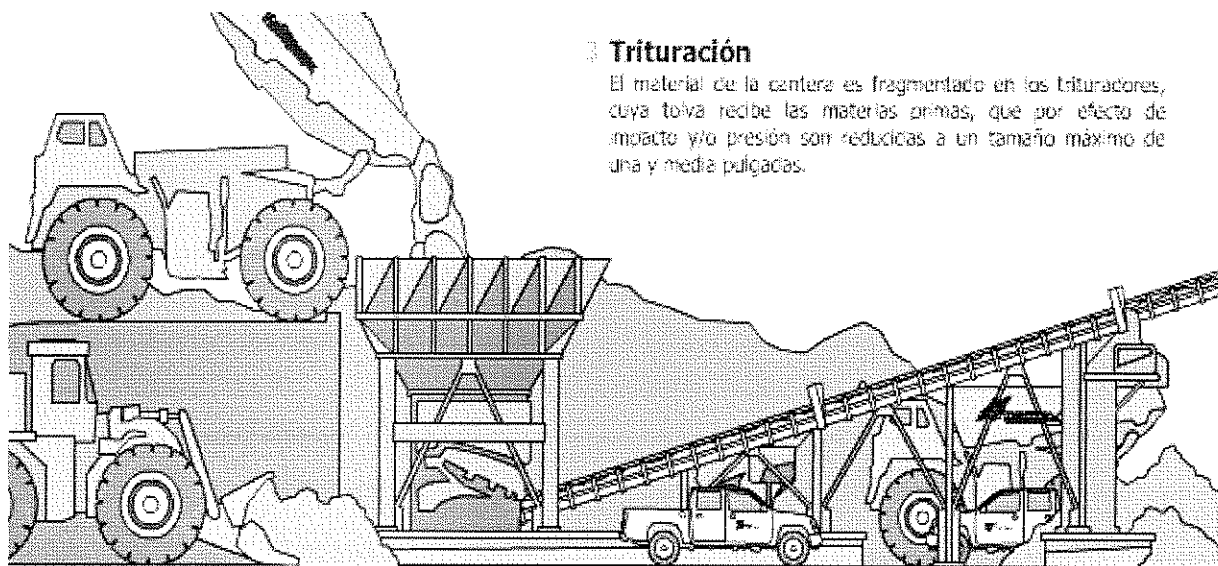
##### **5.3.1.1 Propuesta de control y descripción del sistema**

El sistema el cual se describe a continuación, representa una aplicación real desarrollada en la industria cementera guatemalteca, industria que ha tenido un gran avance con el paso del tiempo dentro y fuera del país, la industria del cemento, como cualquier otra industria, muestra una trayectoria hacia la automatización del control en forma gradual y partiendo siempre del control basado en relés.

El sistema detallado es el que se utiliza dentro del primer paso de trituración de materia prima para la fabricación del cemento, la tolva de almacenamiento de materia prima (rocas de caliza y esquisto) extraída de la cantera. Esta tolva es el primer punto de almacenaje del proceso alimenta a la trituradora de material la cual necesita materias primas distintas en forma dosificada, es decir, se encuentran varias tolvas con distinto tipo de materia

prima, pero el sistema de medición de nivel es idéntico por lo que se centrará únicamente a una tolva, donde se almacenan las rocas extraídas de la cantera.

**Figura 28. Tolva de almacenamiento de materia prima dispuesta a trituración en el proceso de fabricación de cemento**



Fuente: Cemex, **Proceso de producción de cemento**, [www.cemex.com.mx](http://www.cemex.com.mx)

En esta medición de nivel se desea conocer la cantidad de materia prima dentro de la tolva de almacenaje de forma continua, es decir, el comportamiento del producto dentro de recipiente según sea agregado materia prima a la tolva o consumida la materia prima por la trituradora que es la etapa posterior del proceso.

El objetivo principal de la medición de nivel continuo en esta tolva de almacenaje es que el operador de la trituradora conozca la cantidad de materia prima disponible y coordine de forma efectiva la descarga de materia por los camiones de transporte en la tolva, procurando rebasar la capacidad del recipiente o no dejarlo vacío.

El sensor de nivel para la detección debe ser capaz de proporcionar resultados fiables incluso en condiciones críticas. Un sistema de medición exige la utilización de una extensa gama de dispositivos que protejan al proceso y a la maquinaria así como comprobadores de la integridad del eco y elementos que distingan entre el eco en sí y la frecuente presencia del ruido industrial.

Los dispositivos interconectados representan la automatización del sistema correspondiente a la medición de nivel continuo, proporcionando seguridad continua a la maquinaria y previniendo el error humano al dejar sin material la tolva o al sobrepasar su capacidad, deteniendo las máquinas posteriores a la tolva y proporcionando alarmas de aviso de sobre material o falta de material.

#### **5.3.1.2 Criterios para la selección del sistema de ultrasonidos apropiado**

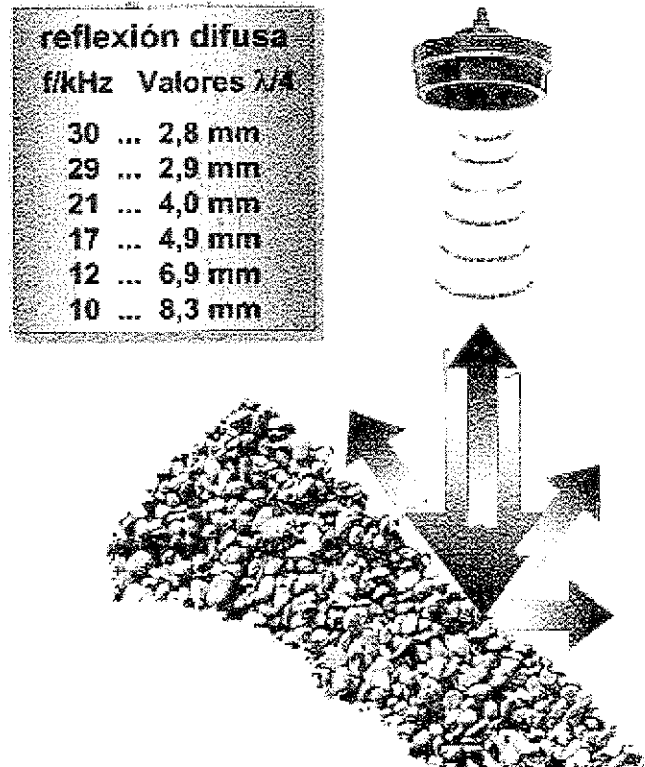
La tolva de almacenaje es de concreto, por lo tanto se debe tomar en cuenta que el material a ser medido es de estado sólido, así como las condiciones críticas de operación del medidor de nivel. Los criterios a tomar a consideración son los siguientes:

- Distancia que se va a medir, este es el primer factor que se debe considerar. Para elegir entre los varios tipos de amplificadores de señal y sensores, debería consultarse como referencia la tabla 3, así como los datos del proceso, a los que corresponde un material completamente sólido, esta distancia es de 6 mts, siendo una tolva de forma cónica. El sistema es desarrollado para obtener una precisión muy alta en distancias cortas por lo que no será lo suficientemente eficaz para distancias largas.

- Composición y propiedades de la superficie del producto, es inherente a este tipo de sistemas que por lo menos una pequeña parte de la señal sonora transmitida se refleje en la superficie del producto. La superficie es un árido compuesto de pequeños granulos, se reflejará menos energía y se requerirá un mayor poder de transmisión para la misma distancia. Este sólido, además para recibir un eco de retorno adecuado, las partículas deben tener cierto tamaño definido en las voladuras de la cantera (explosiones que se realizan con dinamita creando una matriz de explosivos para fragmentar de tamaño regular las rocas), dado que las superficies de los sólidos no suelen ser horizontales, la señal de retorno tiene que proceder de partículas individuales. El tamaño que debe tener la partícula para que la reflexión no sea difusa depende de la frecuencia, cuando mayor sea la superficie de los áridos mayor será la señal reflejada.
- Condiciones para la medición: tanto la señal emitida desde el sensor como la reflejada deben atravesar la atmósfera de la tolva. Para elegir el sistema de medición más adecuado, se deben examinar cuidadosamente todos los factores susceptibles de poder amortiguar la señal o que pueden provocar interferencias por absorción o reflexión. Estos factores incluyen la presencia de polvo, vapor, presión, temperatura y cambios en la composición de gases.



Figura 29. Reflexión difusa tomada en una ladera de áridos por un sensor ultrasónico



Fuente: Endress + Hauser, **Level Measurement**, [www.es.endress.com](http://www.es.endress.com)

- Montaje, el sensor se debe montar en la mejor posición posible para que el sistema funcione correctamente, donde no exista obstáculos entre la superficie del producto y el sensor, en este caso se emplea la pendiente del producto almacenado, y no se requiere un soporte sobresaliente. El sensor es dirigido hacia la ladera de la pendiente (en posición opuesta a la descarga de los camiones) véase la figura 29. A cada sensor le corresponde una distancia de bloque propia, que es la distancia mínima por debajo de la cual el receptor no es capaz de distinguir entre el ultrasonido emitido y la señal reflejada, característica de cada sensor.

### **5.3.1.3 Equipo empleado para el control del sistema**

El sistema de control automatizado que se instaló en la tolva de almacenaje, consiste de los siguientes equipos:

- Un sistema controlador electrónico, PLC, marca Allen-Bradley del tipo PLC 5, el cual sirve para controlar toda la secuencia de arranque, paro, aumento de velocidad, disminución de velocidad, control y monitoreo de fallas del sistema. La estructura del autómata queda comprendida por los siguientes módulos: procesador (CPU) 5/30 con batería de soporte para su memoria RAM, módulo de memoria no volátil para almacenamiento seguro de programa, soporte de administración de hasta un total de 1,024 entradas y salidas, tiempo máximo de lectura de programa de 10ms a su mínima velocidad configurable de 57.6 kbps.; módulos de entradas analógicas configurables para lectura de corriente o voltaje, módulos de salidas analógicas de 0 a 10 VDC, ambos tipos de módulos con reconocimiento de

formatos natural binario con escalas máximas de +/- 9,999; módulos de entradas digitales 24 VCD con retraso en la identificación de señal de 1ms.

- Sensor *Endress+Hauser* de nivel *Prosonic T FTU 230*, para medición de sólidos con entrada de alimentación de 180- 250 VAC y salidas de 4-20 mA y de relés, medición de 0.4 a 8 metros máximo, punto muerto de medición de 0.30 metros, rango de temperatura de -40 a 80 grados centígrados, temperatura de operación en rango de -20 a 60 grados centígrados.
- Equipos periféricos de control como bornes, pulsadores, manijas, relés de acople, fuentes de voltaje, interruptores termomagnéticos, seccionadores fusibles, barras de cobre, etc.

Cabe mencionar que la integración entre distintos fabricantes de equipo de automatización tiene como limitante la inteligencia o capacidad del equipo individual para la realización de la aplicación que se quiere realizar y la habilidad de los distintos dispositivos para comunicarse entre sí.

#### **5.3.1.4 Disposición del control**

El sistema de control seleccionado para la medición de nivel de la tolva de almacenaje de materia prima se toma basándose en la forma de regulación que se debe cumplir para llevar a cabo el proceso.

El sistema debe poder ser operado automáticamente con salidas de relé para el nivel máximo de la tolva y mínimo programado un nivel de alarma y un nivel de acción, el de alarma comunicará en el ordenador la proximidad de nivel máximo o mínimo y el nivel de acción disparará el equipo posterior para protegerle de una falta de material o un rebalse del mismo.

Además en una forma lineal se programa la detección de nivel en un rango de 4-20 mA de salida del sensor equivalente a 0.4 a 5 mts, que es la profundidad de la tolva, esta disposición continua de material es indicada en la pantalla del ordenador al operador quien dispone de distintos materiales para realizar mezclas en equipos posteriores a manera de homogenizar la mezcla fina de materia prima para la fabricación de cemento, éstas son entradas al PLC quien maneja los niveles de disparo de equipos, alarmas e *interlocks* entre equipos (seguridades de paro de protección en equipos relacionados)

El sistema tiene la capacidad de operar en modo local y automático, en modo local se pueden realizar actividades de mantenimiento y prueba de equipos así como programación del sensor de nivel, calibración y verificación de funcionamiento, este modo es exclusivo para el sensor y no posee disparos relacionados con otros equipos, sin embargo, se pueden forzar señales para que sean procesadas por el PLC y de esta manera el operador puede generar señales de arranque, paro, avance, etc. a los equipos relacionados. El modo automático es dependiente de los equipos relacionados.

### **5.3.1.5 Beneficios obtenidos en la aplicación**

Se hace importante mencionar las ventajas principales adquiridas finalmente por la aplicación, alcanzadas gracias al equipo de control. Se consideran entre las más importantes:

- Reducción de los costos de mantenimiento y tiempos muertos de producción debido a la alta confiabilidad del equipo y la disminución de errores en la sincronía que conlleven a los daños presentados en la trituradora, o fajas de transporte de material por rebase o falta del mismo.
- Eliminación de estrés mecánico para los motores de la trituradora y fajas de transporte por exceso de material, lo que permite ampliar el tiempo de vida de los mismos.
- Incremento de velocidades de trabajo, lo que representa mayor producción de cemento, debido a un mejor control de la sincronía de trabajo.
- Mejor respuesta de reacción y detección de fallas del sistema ante situaciones que puedan poner en riesgo al mismo.

### **5.3.2. Caso 2, sistema de detección de nivel por el método de capacitancia**

#### **5.3.1.1 Propuesta de control y descripción del sistema**

Los detectores y medidores de nivel capacitivos se emplean en casi todas las ramas de la industria incluidas la alimentaría, cervecera, bebidas carbonatadas, cárnicas, arenas, gravas, cementos, agua potable y residual, industria pesada e industrias química y petroquímica. Los sistemas se emplean para detección de límite superior y/o inferior y para la medición continua en tanques de almacenamiento, silos, depósitos descubiertos y canalizaciones. Las sondas que se emplean generalmente en la industria del agua y la alimentación se encuentran completamente recubiertas por un material higiénico y resistente a la acumulación de producto.

El sistema el cual se describe a continuación, representa una aplicación real desarrollada en la industria cervecera guatemalteca, industria que ha tenido un gran avance con el paso del tiempo dentro y fuera del país. La industria de la cerveza, como cualquier otra industria, muestra una trayectoria hacia la automatización del control en forma gradual y partiendo siempre del control basado en relés.

El sistema detallado es el que se utiliza en la parte de fermentación de la cerveza, en los depósitos de fermentación de mosto. El mosto es un producto obtenido del cocimiento de maiz, malta, azúcar y lúpulo los cuales son materia prima en la fabricación de la cerveza, el mosto debe ser fermentado dentro de

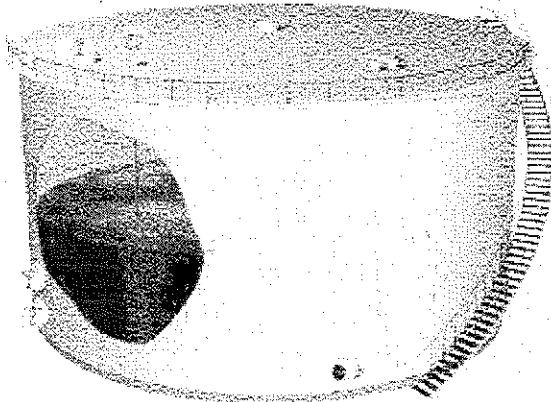
los depósitos entre 21 y 33 días dependiendo la fórmula de la cerveza y las necesidades del mercado.

El sistema posterior a la fermentación del mosto (el mosto se vuelve cerveza después de la fermentación con levadura en los tanques) es la filtración de la cerveza y seguidamente su debido envasado. El llenado y vaciado del tanque se efectúa en forma automática donde un operador en la sala de control autoriza el vaciado o el llenado del tanque.

El sistema de medición y detección de nivel consta de 4 sensores de nivel capacitivos, los cuales son colocados de la siguiente forma:

- 1 detector de nivel de llenado, sensor de capacidad máxima del depósito de almacenaje utilizado para detener a los equipos anteriores e indicación a el operador.
- 1 detector de nivel intermedio, utilizado para el control en el vaciado y llenado del depósito como referencia para la medición de nivel continua en el depósito de almacenaje.
- 1 detector de nivel mínimo, utilizado para el vaciado del depósito y como indicación al equipo posterior de paro.
- 1 medidor de nivel utilizado para conocer la cantidad de producto dentro del depósito de almacenaje, configurable para proporcionar disparos a cierta cantidad de capacitancia. Es importante mencionar que la medición continua por capacidad no suele ser demasiado precisa por las variaciones en el contenido de humedad del producto, por lo que este sensor es instalado por seguridad en caso de falla de los detectores de nivel.

Figura 30. **Deposito típico de almacenamiento de mosto en el proceso de fabricación de cerveza**

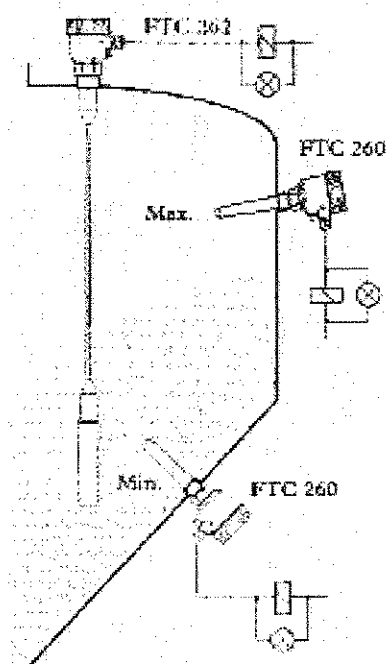


Fuente: Safety-SC, **Safety Integrity level**, [www.ab.com](http://www.ab.com)

La figura 30 muestra los detectores de nivel y en la parte interna se puede observar el sensor capacitivo de medición continua, estos sistemas de medición capacitivos no tienen partes móviles, y son capaces de resistir presiones y temperaturas relativamente altas comparadas con el proceso de producción, que son los factores relevantes en estas aplicaciones. La figura 31 muestra un sistema de detección de máximo y mínimo común y un sensor conductivo para la medición de nivel continuo, como se mencionó anteriormente éste funciona como reserva y por seguridad ante fallos de los detectores pues su medición es afectada por la humedad del producto, en la figura 30 falta el detector de nivel intermedio, el cual generalmente es utilizado en depósitos de gran altura, el criterio para utilizar el detector intermedio se basa en términos generales arriba de 5 mts de altura del depósito se tiene la necesidad de colocar un detector de nivel intermedio, para que sirva de referencia a la sonda de medición continua.



Figura 31. Sistema típico de detección y medición de nivel



Fuente: Safety-SC, **Safety Integrity level**, [www.ab.com](http://www.ab.com)

El depósito de almacenamiento es de tipo sellado, por lo que no debería tener entradas falsas de aire ya que esto podría contaminar el producto para el llenado del mosto que utiliza una bomba de alta presión y que es parte de la etapa anterior del proceso. Para el vaciado del producto se utiliza una bomba similar como parte de la etapa posterior de filtrado de la cerveza, el depósito es afectado por la espuma que se genera en la fermentación que es despreciable ya que los detectores son configurados para proporcionar disparos en la capacitancia correspondiente al producto en sí.

### **5.3.2.2 Criterios para la selección del sistema de ultrasonidos apropiado**

El depósito de almacenaje es de metal recubierto por un material higiénico en la parte interior que no contamine el producto ya que es de clase de bebidas y alimentos, se debe tomar en cuenta que el material a ser medido es de estado líquido así como las condiciones críticas de operación del detector y medidor de nivel, los criterios a tomar a consideración son los siguientes:

- Distancia que se va a medir, este es el primer factor que se debe considerar. Para elegir entre los varios tipos de detectores de nivel y para conocer el largo de la sonda del medidor de nivel, debería consultarse como referencia la tabla 3, así como los datos específicos del proceso, a los que corresponde un material completamente líquido que en cantidades grandes genera una cantidad de espuma despreciable. Esta altura es de 20 mts con capacidad de 600,000 litros, siendo un depósito de forma cilíndrica y una base de forma cónica por cuestiones de proceso. El sistema es desarrollado para obtener una precisión muy alta en los detectores ya que estos estarán sumergidos completamente en el producto, el error aumenta en la medición continua ya que la capacitancia es variada según la humedad que el producto posee.
- Composición y propiedades del producto, es inherente a este tipo de sistemas que por lo menos una pequeña parte de la capacitancia obtenida se refleje en producto afectada por la humedad del mismo. El producto es un líquido de baja viscosidad muy manejable y con apariencia muy similar al producto final de la cerveza, con residuos de levadura producto de la fermentación.

- Condiciones para la medición: la elección de la sonda apropiada (así como la sonda de un interruptor de nivel compacto) es esencial para que un sistema de medición de niveles y detección ejecute sus funciones correctamente y con la mayor precisión y fiabilidad. En la selección de una sonda se debe tener en cuenta la función que efectúa el sistema de paro y arranque de bombas de fases posteriores y anteriores al proceso, la forma del depósito que es cilíndrico con terminación cónica en la parte de la descarga de producto. La presión por ser un depósito sellado completamente y la temperatura interna del producto y del proceso en sí, conocer si el producto es corrosivo o abrasivo, la viscosidad, densidad relativa, método de llenado, vibraciones y el potencial de acumulación.
- Montaje, el sensor se debe montar en la mejor posición posible para que el sistema funcione correctamente, el flujo no debe ir directamente hacia la sonda para evitar conmutaciones esporádicas y daños en la sonda. No se deben poner sondas a menos de 500 mm de distancia, unas de otras, ya que podría existir interferencia entre estas sondas, cuando la sonda tiene tendencia a oscilar debe anclarse, si es una sonda de varilla, o tensarse, si es de cable. Si se emplean sondas con aislamiento parcial, el dispositivo de anclaje debe estar aislado de la pared del recipiente, en el caso de la sonda de medición de nivel que se encuentra verticalmente, la distancia entre la sonda y la pared del silo debería ser, como mínimo un 10% de la longitud de la sonda. En la tubuladura empleada en el montaje de sondas horizontales no debería producirse contaminación o acumulación. Si se prevé que pueda suceder para determinados productos, debería emplearse una sonda con apantallamiento o limpieza interna.

### 5.3.2.3 Equipo empleado para el control del sistema

El sistema de control automatizado que se instaló en la tolva de almacenaje, consiste de los siguientes equipos:

- Un sistema controlador electrónico, PLC, marca Allen-Bradley del tipo PLC 5, el cual sirve para controlar toda la secuencia de arranque, paro, aumento de velocidad, disminución de velocidad, control y monitoreo de fallas del sistema. La estructura del autómatas queda comprendida por los siguientes módulos: procesador (CPU) 5/30 con batería de soporte para su memoria RAM, módulo de memoria no volátil para almacenamiento seguro de programa, soporte de administración de hasta un total de 1,024 entradas y salidas, tiempo máximo de lectura de programa de 10ms a su mínima velocidad configurable de 57.6 kbps.; módulos de entradas analógicas configurables para lectura de corriente o voltaje, módulos de salidas analógicas de 0 a 10 VDC, ambos tipos de módulos con reconocimiento de formatos natural binario con escalas máximas de +/- 9,999; módulos de entradas digitales 24 VCD con retraso en la identificación de señal de 1ms, 16 terminales de conexión y corriente máxima de 2.0 mA por entrada; módulos de salidas digitales 120 VCA de 16 terminales de conexión, voltaje de operación 92-120 voltios y corriente máxima de 2.0 A por salida.
- 3 Sensor *Endress + Hauser* de nivel para la detección *Multicap 1500Z*, para medición de líquidos con entrada de alimentación de 180- 250 VAC y salidas de 4-20 mA y de reles, medición de 0.2 pF a 8.9 pF máximo, rango de temperatura de -40 a 150 grados centígrados, temperatura de operación en rango de -20 a 80 grados centígrados, para trabajar en presiones de hasta 360 psi.

- 1 Sensor *Endress + Hauser* de nivel para la medición *Multicap T DC 12 TA*, para medición de líquidos con entrada de alimentación de 180- 250 voltios AC y salidas de 4-20 mA y de relés, medición de 0.2 pF a 8.9 pF máximo, rango de temperatura de  $-40$  a  $150$  grados centígrados, temperatura de operación en rango de  $-20$  a  $80$  grados centígrados, para trabajar en presiones de hasta 360 psi.
- Equipos periféricos de control como bornes, pulsadores, manijas, relés de acople, fuentes de voltaje, interruptores termomagnéticos, seccionadores fusibles, barras de cobre, etc.

Cabe mencionar que la integración entre distintos fabricantes de equipo de automatización tiene como limitante la inteligencia o capacidad del equipo individual para la realización de la aplicación que se quiere realizar y la habilidad de los distintos dispositivos para comunicarse entre sí.

#### 5.3.2.4 Disposición del control

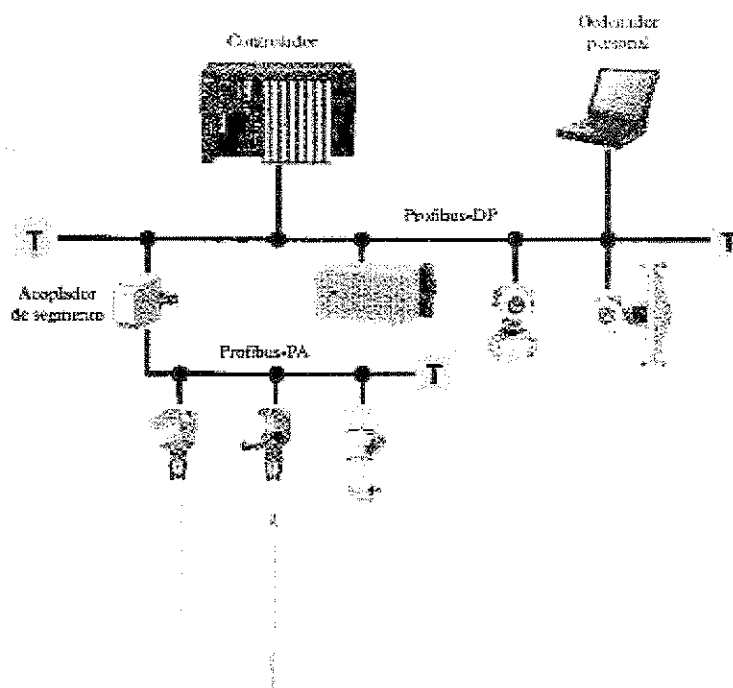
El sistema de control seleccionado para la medición y detección de nivel del depósito de almacenaje de mosto se tomo basándose en la forma de regulación que se debe cumplir para llevar a cabo el proceso.

El sistema debe ser operado automáticamente con salidas de relé para el nivel máximo del depósito y mínimo, así como para el nivel intermedio, solamente con un nivel de acción e indicación, los niveles de acción en el caso del nivel mínimo activa el control de paro de la bomba de succión ubicada en la fase de filtrado mientras que el nivel máximo activa el control de paro de la bomba de llenado del depósito de almacenaje, así como las alarmas son obtenidas por el operador en el control del sistema, el medidor continuo de nivel obtiene capacitancia en el sensor y es programado en el mismo para realizar una transducción de capacitancia a un rango de 4-20 mA que indica el total del recipiente, se le programan alarmas de nivel mínimo y máximo como indicación y en caso de emergencia que no actúen los niveles se realizó una relación de capacitancias para que accione paros en caso de vacío o llenado.

Además en una forma lineal se programa la detección de nivel en un rango de 4-20 mA de salida del sensor equivalente a 5pF, que es la capacitancia obtenida cuando la sonda se encuentra completamente sumergida en el producto, la disposición continua de material es indicada en la pantalla del ordenador al operador quién dispone de distintos controles de fase anterior y posterior, éstas son entradas al PLC quien maneja los niveles de disparo de equipos, alarmas e *interlocks* entre equipos (seguridades de paro de protección en equipos relacionados)

El sistema tiene la capacidad de operar en modo local y automático, en modo local se pueden realizar actividades de mantenimiento y prueba de equipos, así como programación del sensor de nivel, calibración y verificación de funcionamiento, este modo es exclusivo para el sensor y no posee disparos relacionados con otros equipos, sin embargo, se pueden forzar señales para que sean procesadas por el PLC y de esta manera el operador puede generar señales de arranque, paro, avance, etc., a los equipos relacionados. El modo automático es dependiente de los equipos relacionados.

Figura 32. **Conexión directa de indicadores de nivel capacitivos a un sistema de bus actual**



Fuente: Endress + Hauser, Level Measurement, [www.es.endress.com](http://www.es.endress.com)

### 5.3.2.5 Beneficios obtenidas en la aplicación

Se hace importante mencionar las ventajas principales adquiridas finalmente por la aplicación, alcanzadas gracias al equipo de control. Los más importantes son:

- Reducción de los costos de mantenimiento y tiempos muertos de producción, debido a la alta confiabilidad del equipo y la disminución de errores en la sincronía que conlleven a los daños presentados en las bombas de llenado y vaciado del depósito de almacenaje de mosto, así como manteniendo un control de nivel de material dentro del depósito.
- Eliminación de estrés mecánico para los motores de la bombas por trabajo en vacío evitando así el golpe de ariete, lo que permite ampliar el tiempo de vida de los mismos.
- Incremento de velocidades de trabajo, lo que representa mayor producción de cemento, debido a un mejor control de la sincronía de trabajo.
- Mejor respuesta de reacción y detección de fallas del sistema ante situaciones que puedan poner en riesgo al sistema.



## CONCLUSIONES

1. La función de medición de un proceso de producción y los datos obtenidos en un proceso, así como los datos del producto a almacenar, son los criterios base para la selección de un sensor de nivel para un proceso específico. Así se garantiza que la medición sea segura, evitando arriesgar al personal de trabajo o al equipo utilizado.
2. La ingeniería de medición de nivel es el empleo de instrumentos para la detección y medición de nivel, basado en un sistema de control que puede ser de lazo abierto o cerrado y abarca un área extremadamente amplia utilizando sensores de tipo mecánico, electromecánico y electrónico.
3. Los métodos de medición y selección de nivel son basados en las características del producto de almacenaje así como el depósito donde se encuentran almacenados referidas a las variables del proceso (presión, temperatura, vibración, etc.)
4. Una selección adecuada para la medición y detección de nivel no depende únicamente de la instalación de dispositivos que permitan el control y monitoreo, es necesaria una selección adecuada de tecnología apropiada a un nivel más amplio de control que sirva de medio para alcanzar los requerimientos del sistema sin que se sacrifique la confiabilidad, flexibilidad y seguridad de operación del mismo.

## RECOMENDACIONES

1. Reconociendo el avance tecnológico existente hoy en día para la medición y detección de niveles en silos y tolvas de almacenaje se hace necesario el considerar no sólo el control propio del dispositivo de medición de forma independiente, debe preverse también el poderlo integrar, ya sea a corto, mediano o largo plazo, como parte de un sistema global de información que permita la facilitación de operación, integración con nuevos equipos y, lo más importante, identificación de fallas para garantizar la confiabilidad, seguridad y eficiencia del sistema de producción al cual pertenezca.
2. Aunque muchos sistemas antiguos de medición y detección de nivel sean base de la productividad actual dentro de diversas aplicaciones, debe considerarse un sistema compartido de mayor versatilidad que permita no sólo incrementar la funcionalidad actual sino que permita ampliar la capacidad de respuesta ante futuras necesidades.
3. Conocer los aspectos de seguridad mínimos y máximos es de gran importancia en el momento de instalación o mantenimiento de un detector o medidor de nivel considerando el producto a medir y conocer el procedimiento sugerido por el fabricante de autoseguimiento de la seguridad.

4. El fabricante proporciona el manual de usuario del dispositivo, donde especifica los intervalos de mantenimiento y los aspectos a tomar en consideración en el momento de un mantenimiento preventivo, es importante capacitar al personal encargado de realizar un mantenimiento preventivo informándolo con este manual de usuario.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ALLEN BRADLEY and *Rockwell Automation*; **Catalogs on CD**, Rockwell Automation, publication RA-CA001A-EN-C Dec 2002.
2. Brenes, Julio, **Metrología Básica**. 2da ed. México: Editorial Secal, 1998.
3. ENDRESS + HAUSER, **Level Measurement**. Located [www.es.endress.com](http://www.es.endress.com) agosto 2004–febrero 2005
4. Boylestad, Robert y Lous Nashelsky, **Electrónica teoría de circuitos**. 5ta ed. México: Editorial Prentice-Hall, s.a.
5. Krauss, John; **Electromagnetismo con aplicaciones**. 5ta ed. México: Editorial McGraw-Hill, s.a.
6. Ministerio de economía, **Dirección del sistema nacional de calidad**, ubicado en [www.mineco.gob.gt](http://www.mineco.gob.gt) agosto 2004–febrero 2005
7. Morris, A. S. **Principles of measurement and instrumentation**, 2da ed. U.S.A.: Editorial Prentice-Hall, 1998.
8. *Rockwell Automation, Protection System and Levels*, located at [www.ab.com](http://www.ab.com) agosto 2004–febrero 2005.

9. Strembler, Ferrel; **Introducción a los sistemas de comunicación.**  
3<sup>a</sup>. ed. España: Editorial Iberoamericana, s.a.
  
10. Van Valkenburg, **Análisis de redes.** 2da ed. México: Editorial Limusa.  
s.a.
  
11. Wim Van de Kamp, **Teoría de mediciones.** 2da ed. España: Editorial  
Sant Just Desvern, s.a.

