



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

**FUNDAMENTOS, CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS COMPETITIVAS PARA
EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN
DE NIVEL BASADO EN TRANSFERENCIA DE CUSTODIA**

Carlos Eduardo Archila Morán

Asesorado por el Ing. José Antonio de León Escobar

Guatemala, junio de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**FUNDAMENTOS, CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS COMPETITIVAS PARA
EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN
DE NIVEL BASADO EN TRANSFERENCIA DE CUSTODIA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CARLOS EDUARDO ARCHILA MORAN

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ ANTONIO DE LEÓN ESCOBAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, JUNIO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Ingrid Salomé Rodríguez de Loukota
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**FUNDAMENTOS, CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS COMPETITIVAS PARA
EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN
DE NIVEL BASADO EN TRANSFERENCIA DE CUSTODIA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería de Mecánica Eléctrica, con fecha marzo de 2010.


Carlos Eduardo Archila Morán

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

Guatemala, 01 de agosto de 2011

Ing. Carlos Guzmán
Coordinador del Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica-Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Guzmán:

Por este medio le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado "Fundamentos, Características y Ventajas Competitivas para el Diseño e Implementación de un Sistema de Instrumentación de Nivel Basado en Transferencia de Custodia", elaborado por el estudiante Carlos Eduardo Archila Morán

El mencionado trabajo llena los requisitos para dar mi aprobación, e indicarle que el autor y mi persona somos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Atentamente,

Ing. José Antonio de León Escobar, M.A.
Colegiado No. 8281
Asesor

José Antonio de León Escobar
INGENIERO ELECTRONICO
COLEGIADO No. 8.281



Ref. EIME 62. 2011
Guatemala, 4 de OCTUBRE 2011.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

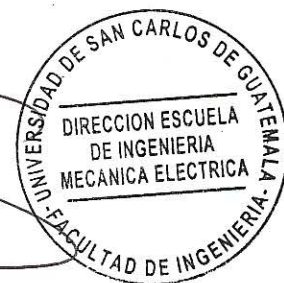
Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**FUNDAMENTOS, CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS
COMPETITIVAS PARA EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE
UN SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN DE NIVEL BASADO EN
TRANSFERENCIA DE CUSTODIA,** del estudiante Carlos
Eduardo Archila Morán, que cumple con los requisitos establecidos
para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador de Electrónica



CEGS/sro



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 68. 2011.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; CARLOS EDUARDO ARCHILA MORÁN titulado: FUNDAMENTOS, CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS COMPETITIVAS PARA EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN DE NIVEL BASADO EN TRANSFERENCIA DE CUSTODIA, procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 25 DE OCTUBRE 2011.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **FUNDAMENTOS, CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS COMPETITIVAS PARA EL DISEÑO E IMPELEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN DE NIVEL BASADO EN TRANSFERENCIA DE CUSTODIA**, presentado por el estudiante universitario **Carlos Eduardo Archila Morán**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, junio de 2012

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser mí guía, por darme fortaleza y entendimiento. Por ser la fuente de mi sabiduría durante este largo camino y por estar hoy donde estoy.
- Mis padres** Carlos Eduardo Archila Díaz y Luz Patricia Morán López de Archila porque han sido siempre mis ejemplos a seguir y quienes con su apoyo incondicional, su amor y atenciones me impulsaron a cumplir con este objetivo.
- Mis hermanos** Fernando José Archila Morán, Carmen María Archila Morán y Manuel Alejandro Archila Morán, por estar siempre pendientes de mí y que tomen este ejemplo como motivación para seguir compartiendo estos logros.
- Mis abuelos** Carlos Enrique Archila Jerez, Carmen Consuelo Díaz de Archila, José Manuel Morán que en paz descansen y por trazar siempre mí camino desde el cielo. A Socorro de María López por sus muestras de cariño y afecto hacia mi persona.

AGRADECIMIENTOS A:

A todos mis amigos

Por estar siempre incondicionalmente cuando los necesite y cuando los necesito, por haber compartido decepciones y alegrías junto a mí en todo este tiempo, en especial a: Julio Gaitán, Sergio Girón, Carlos López, Kevin Hernández, Marcos Morales, Miguel Marroquín, Wellington Vázquez, Edgar Gómez, Guillermo Santos.

Al Ingeniero José de León

Por todo su conocimiento trasladado a mi persona y por su apoyo moral y académico.

Catedráticos

Ing. Julio Barrios, Ing. Guillermo Puente, Inga. Ingrid de Loukota por el apoyo y convivencia en el largo camino por las aulas de la universidad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. FUNDAMENTOS DE SISTEMAS DE INSTRUMENTACIÓN	1
1.1. Importancia de la instrumentación.....	1
1.2. Definiciones importantes de instrumentación	3
1.2.1. Partes de un sistema de control.....	3
1.2.1.1. Controlador	3
1.2.1.2. Sistema automatizado	3
1.2.1.2.1. Parte de mando	4
1.2.1.2.2. Parte operativa.....	4
1.2.1.3. Convertidor	4
1.2.1.4. Lazo abierto de control	4
1.2.1.5. Lazo cerrado de control	5
1.2.1.6. Tendencia	6
1.2.1.7. Elemento final de control	6
1.3. Definición transferencia de custodia	6
2. ELEMENTOS DE SISTEMAS PARA TRANSFERENCIA DE CUSTODIA: INSTRUMENTOS, EQUIPOS Y PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN	11
2.1. Instrumentos	11

2.1.1.	Caudalímetros	11
2.1.1.1.	Turbina	11
2.1.1.2.	Ultrasónico	12
2.1.1.3.	Magnético.....	13
2.1.1.4.	Coriolis	16
2.1.1.5.	Desplazamiento positivo.....	18
2.1.1.6.	V-Cone	20
2.1.2.	Medidor de nivel	22
2.1.2.1.	Servomecanismo.....	23
2.1.2.2.	Radar.....	24
2.2.	Protocolos de comunicación	24
2.2.1.	Foundation fieldbus	25
2.2.2.	Profibus	25
2.2.3.	HART (Highway Addressable Remote Transducer)	26
3.	APLICACIÓN: MEDICIÓN DE NIVEL DE UN TANQUE DE ALCOHOL ETÍLICO; CARACTERÍSTICAS Y FACTORES A CONSIDERAR UTILIZANDO INSTRUMENTOS CON TECNOLOGÍA RADAR	29
3.1.	Descripción	29
3.2.	Características de la aplicación: ventajas competitivas y desventajas	30
3.2.1.	Características de aplicación: medición de nivel con instrumentos de tecnología RADAR.....	30
3.2.1.1.	Precisión.....	33
3.2.1.2.	Diversidad de ambiente.....	33
3.2.1.3.	Alto rango de medición.....	33
3.2.1.4.	Durabilidad	34
3.2.1.5.	Fácil de utilizar	34
3.2.1.6.	Diversidad de aplicaciones.....	34

3.2.1.7.	Medición en líquidos	34
3.2.1.8.	Mantenimiento	35
3.2.2.	Ventajas del sistema	35
3.2.2.1.	Diseño.....	35
3.2.2.3.	Tecnología	35
3.2.2.4.	Versátil.....	35
3.2.2.5.	Frecuencia de operación baja.....	36
3.2.2.6.	Relación señal a ruido	36
3.2.2.7.	Linearización de lectura	36
3.2.2.8.	Medición continua	36
3.2.2.9.	Mantenimiento	37
3.2.2.10.	Ancho de haz.....	37
3.2.2.11.	Certificado para transferencia de custodia.....	37
3.2.2.12.	Instalación y parametrización.....	37
3.2.2.13.	Fiabilidad de medida.....	38
3.2.2.14.	Soporta alta temperatura	38
3.2.3.	Desventajas del sistema	38
3.2.3.1.	Medición en espacio libre	39
3.2.3.2.	Manejo del equipo.....	39
3.2.3.3.	Ondas electromagnéticas en productos de alta conductividad	39
3.2.3.4.	Medición de sólidos	39
3.2.3.5.	Espuma y polvo en fluidos	40
3.3.	Factores a considerar en la implementación de un sistema basado en transferencia de custodia	40
3.3.1.	Factores en la etapa de diseño.....	40
3.3.1.1.	Tipos de instrumentos.....	41
3.3.1.2.	Aplicación.....	41

3.3.1.3.	Presión y temperatura de operación.....	41
3.3.1.4.	Constante dieléctrica	42
3.3.1.5.	Antena	42
3.3.1.5.1.	Antena cónica	42
3.3.1.5.2.	Antena parabólica y planar... ..	43
3.3.1.5.3.	Antena de varilla.....	43
3.3.1.5.4.	Antena de ventana	44
3.3.1.6.	Rango de medición.....	45
3.3.1.7.	Incerteza.....	45
3.3.1.8.	Tolerancia de capa de cubierta	45
3.3.1.9.	Turbulencia.....	45
3.3.1.10.	Espuma	46
3.3.1.11.	Presupuesto	46
3.3.1.12.	Frecuencia de operación	46
3.3.1.13.	Número de conductores	47
3.4.	Evaluación económica de la implementación del proyecto	48
3.4.1.	Análisis	49
3.4.2.	Costos de implementación	59
3.4.3.	VAN.....	59
3.4.4.	TIR.....	60
CONCLUSIONES.....		61
RECOMENDACIONES		63
BIBLIOGRAFÍA		65
APÉNDICE		67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Lazo de control abierto.....	5
2.	Lazo de control cerrado.....	5
3.	Funcionamiento de un medidor ultrasónico.....	13
4.	Funcionamiento de un caudalímetro magnético.....	14
5.	Ejemplificación de la ley de Faraday en un caudalímetro magnético ...	15
6.	Funcionamiento de un caudalímetro tipo Coriolis.....	17
7.	Interior de un caudalímetro tipo Coriolis.....	18
8.	Imagen de interior caudalímetro de tipo desplazamiento positivo	19
9.	Funcionamiento de un caudalímetro de tipo desplazamiento positivo	20
10.	Imagen interior de un caudalímetro tipo V-cone.....	21
11.	Gráfico del comportamiento del protocolo HART	26
12.	Transmisor de nivel tipo radar.....	31
13.	Comparación de frecuencia utilizada en el transmisor de nivel tipo radar	47
14.	Esquema de un sistema de monitoreo de nivel.....	48
15.	Gráfico de posición de varilla con error máximo.....	50
16.	Gráfico de posición de varilla con error mínimo	51
17.	Gráfico con instrumento de medición radar.....	53
18.	Gráfico con instrumento de medición radar.....	54

TABLAS

I.	Clases de exactitud de acuerdo a OIML R-117	8
II.	Errores máximos permisibles de acuerdo a la clase de exactitud, según OIML R-117	9
III.	Cuadro comparativo de protocolos de comunicación	27
IV.	Evaluación económica del proyecto	58

GLOSARIO

Atmósfera peligrosa	Área próxima al incidente, donde las concentraciones ambientales u otras características de materiales peligrosos representan un riesgo para las personas, bienes y ambiente.
Error	Diferencia algebraica entre el valor leído o transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida.
Error de cero	Desplazamiento constante de todos los valores de salida del instrumento con relación a la recta que relaciona la variable de entrada con la de salida de un instrumento en el punto cero.
Estabilidad	Capacidad de un instrumento para mantener su comportamiento durante su vida útil y de almacenamiento especificadas.
Exactitud	Cualidad de un instrumento de medida por la que tiende a dar lecturas próximas al verdadero valor de la magnitud medida. En otras palabras, es el grado de conformidad de un valor indicado a un valor estándar aceptado o valor ideal, considerando este valor ideal como si fuera el verdadero.

Fiabilidad	Medida de la probabilidad de que un instrumento continúe comportándose dentro de límites especificados de error a lo largo de un tiempo determinado y bajo condiciones especificadas.
Función de transferencia	Relación matemática, gráfica o tabular entre las expresiones función del tiempo de señales de salida y de entrada a un sistema o elemento. Equivale también al cociente de las transformadas de Laplace de las funciones de respuesta y de excitación.
Histéresis de un instrumento	Diferencia máxima en los valores de salida del instrumento para el mismo valor cualquiera del campo de medida cuando la variable recorre toda la escala en los dos sentidos ascendente y descendente. Viene expresada en tanto por ciento del alcance.
Incertidumbre de la medida	Resultado de una operación de calibración, en la que se compran el instrumento a calibrar con un aparato patrón para averiguar si el error se encuentra dentro de los límites dados por el fabricante del instrumento. Como el aparato patrón no permite medir exactamente el valor verdadero y como además en la operación de comparación intervienen diversas fuentes de error, no es posible caracterizar la medida por un único valor, lo que da lugar a la llamada incertidumbre de la medida o incertidumbre.

Instrumentación electrónica	Parte de la electrónica, que se encarga del diseño y manejo de los aparatos electrónicos y eléctricos, sobre todo para su uso en mediciones.
Instrumento	Dispositivo que mide o manipula variables de un proceso.
Integración	Constituir un todo, completar un todo con las partes que faltaban o hacer que alguien o algo pase a formar parte de un todo.
Interoperabilidad	Posibilidad de interconectar y operar dispositivos de varios fabricantes en la misma red sin pérdida de funcionalidad, es decir, se puede sustituir un equipo de un fabricante por otro pudiendo utilizar de inmediato las prestaciones extras que no de este segundo dispositivo.
Offset	Desviación permanente que existe en régimen en el control proporcional cuando el punto de consigna esta fijo.
Precisión	Cualidad de un instrumento por la que tiende a dar lecturas muy próximas unas a otras, es decir, es el grado de dispersión de las mismas.
Proceso controlado	Conjunto de funciones realizadas por el equipo en el cual es controlada la variable.

Protocolo de comunicación	Conjunto de reglas normalizadas para la representación, señalización, autenticación y detección de errores necesario para enviar información a través de un canal de comunicación.
Realimentación	Parte de la señal de salida de un sistema que vuelve a la entrada.
Repetitividad	Capacidad de reproducción de los valores de salida del instrumento al medir repetidamente valores idénticos de la variable en las mismas condiciones de servicio y en el mismo sentido de variación recorriendo todo el campo. Se expresa en tanto por ciento del alcance.
Ruido eléctrico	Cualquier perturbación eléctrica o señal accidental no deseadas que modifica la transmisión, indicación o registro de los datos deseados.
Seguridad intrínseca	Sistema de seguridad para atmosferas peligrosas que limita la capacidad de un circuito para producir chispas eléctricas que tengan la suficiente energía para provocar la ignición de la mezcla explosiva.
Sensibilidad	Razón entre el incremento de la lectura y el incremento de la variable que lo ocasiona después de haberse alcanzado el estado de reposo. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida.

Señal	Información que emana de un instrumento; información representativa de un valor cuantificado.
Señal de salida	Señal producida por un instrumento que es función de la variable medida (entrada).
Señal de salida analógica	Señal de salida del instrumento que es una función continua de la variable medida.
Señal de salida digital	Señal de salida del instrumento que representa la magnitud de la variable medida en forma de una serie de cantidades discretas codificadas en un sistema de notación.
SIL (<i>Safety Integrity Level</i>)	Especifica el Nivel de Integridad de la Seguridad que define, en función del posible impacto de un fallo sobre personas y bienes y su probabilidad, el nivel de seguridad requerido del sistema y, por tanto, de todos sus componentes.
Span	Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento.
Transductor	Recibe una señal de entrada en función de una o más cantidades físicas y la convierte en una señal de salida.

Transferencia de custodia	Procedimiento en el cual un producto es entregado a un tercero para su manejo y custodia, manteniéndose la propiedad del mismo.
Transmisor	Capta la variable de proceso a través del elemento primario (sensor) y la convierte a una señal de transmisión estándar.
Variable controlada	Dentro del bucle de control es la variable que se capta a través del transmisor y que origina una señal de realimentación.
Variable manipulada	Cantidad o condición del proceso variada por el elemento final de control.
Variable medida	Cantidad, propiedad o condición física que es medible.
Vida útil de servicio	Tiempo mínimo especificado durante el cual se aplican las características de servicio continuo o intermitente del instrumento sin que se presenten cambios en su comportamiento más allá de tolerancias especificadas.
Zona muerta (<i>Dead Band</i>)	Campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o la señal de salida del instrumento. Viene dada por en tanto por ciento del alcance de la medida.

RESUMEN

Las fábricas en las cuales el producto final involucra una fuerte cantidad de dinero buscan ser lo más certeros posibles en la venta de éste. Un pequeño error en pequeñas cantidades es insignificante, pero cuando las ventas son voluminosas, ese pequeño error puede convertirse en una gran pérdida. Esto lleva a pensar en un sistema que nos asegure la mayor cantidad de ingresos.

El primer capítulo busca dar una perspectiva del mundo de la instrumentación y automatización. Dando a conocer que es, de que manera funciona, los elementos que la constituyen, la importancia de ésta, etc. Se recalca su importancia en la vida cotidiana de las fábricas de procesos industriales; siendo ésta la encargada de ser los sentidos de la planta recolectando información del proceso como temperatura, presión, flujo, entre otras.

Después de conocer la definición de transferencia de custodia, en el capítulo 2 nos adentramos en equipos y protocolos de comunicación que son utilizados para esta certificación. Se dan a conocer los caudalímetros y medidores de nivel que cuentan con esta certificación, ésta se adquiere básicamente por la tecnología que utilizan estos instrumentos para efectuar la medición. También se mencionan los protocolos de comunicación que manejan estos dispositivos.

El capítulo 3 es un análisis técnico económico de la implementación del medidor de nivel tipo radar FMCW con certificado de transferencia de custodia. Se dan a conocer las características de este medidor, ventajas y desventajas de

la tecnología y los factores que no pueden pasarse por alto en el momento de diseñar el sistema de medición. Por último se hace un estudio económico del proyecto con el VAN y la TIR para determinar la rentabilidad del mismo.

OBJETIVOS

General

Determinar la factibilidad técnica y económica del diseño e implementación de un control de inventario de tanques de etanol utilizando una planta de producción modelo con instrumentos medidores de nivel tipo radar con certificado de transferencia de custodia.

Específicos

1. Determinar si las características de los medidores de nivel tipo radar cumplen con los requerimientos para diseñar un sistema de medición fiable y certero.
2. Diseñar un sistema de monitoreo y control de nivel tipo radar que cumplan con los requerimientos de exactitud necesarios para la distribución de etanol con bajos costos ocasionados por error en la medición.
3. Determinar con los métodos de análisis económico de proyectos VAN y TIR la rentabilidad de la ejecución del proyecto de monitoreo de niveles con instrumentos de tecnología radar con certificado de transferencia de custodia.

INTRODUCCIÓN

Desde que el hombre se interesó en conocer las cantidades y condiciones que se encontraban en ciertos recipientes y conforme estos intereses fueron creciendo, los instrumentos de medición comenzaron a desarrollarse de manera acelerada. Interesaba conocer una magnitud, y con base a esta por medio de un algoritmo o modelo matemático llegar a conocer el valor de la variable de proceso deseada.

En procesos donde se manejan fuertes cantidades de dinero debido al costo de la materia resguardada en los contenedores, es vital conocer el valor más acertado (pues siempre existirá algún error, ningún equipo creado por el ser humano es perfecto) del contenido ya que una pequeña variación del conocimiento del contenido real puede significar una gran pérdida para la empresa. Por tanto, es acá donde se busca un instrumento que tenga una muy buena precisión y repetitividad para mantener un control fiable durante las mediciones.

Las personas que tienen a su cargo una planta de proceso desean que las medidas que se manejan en sus contenedores sean ideales, esto no siempre es posible ya que toda medición tiene incertidumbre. Por tanto, es conveniente definir qué tan certeros tienen que ser los equipos de medición de tal forma que la inversión se recupere lo más pronto posible.

Existen diferentes tecnologías para diversas aplicaciones, conocer las características de funcionamiento de cada tecnología es fundamental para una

respuesta óptima en la medición ya que las condiciones físicas y químicas cambian de acuerdo al proceso.

Cabe recalcar que la tecnología de equipos con características favorables a la medición precisa puede ser muy cara, por lo que no está de más y es vital considerar el costo de los instrumentos en la toma de decisiones para la adquisición de estos instrumentos. Es indispensable saber si es favorable el uso de estos instrumentos o si el costo es muy alto y no es de suma importancia una medida demasiado certera.

1. FUNDAMENTOS DE SISTEMAS DE INSTRUMENTACIÓN

1.1. Importancia de la instrumentación en la industria

La instrumentación electrónica es parte de la electrónica, que se encarga del diseño y manejo de los equipos electrónicos y eléctricos, sobre todo para su uso en mediciones.

La instrumentación electrónica se aplica en el censado y procesamiento de la información proveniente de variables físicas y químicas, a partir de las cuales realiza el monitoreo y control de procesos, empleando señales eléctricas.

Los instrumentos de medición comenzaron a desarrollarse de manera acelerada desde que el hombre se interesó en conocer las cantidades y condiciones que se encontraban en ciertos recipientes. El interés despertó cuando se quiso llegar a conocer una magnitud, y en base a esta por medio de un algoritmo o modelo matemático obtener el valor de la variable de proceso deseada. Diferentes tecnologías fueron implementadas para la fabricación de instrumentos; tecnología mecánica, eléctrica, electrónica etc. Pero estas tecnologías de principio no llenaban las expectativas de los clientes, se trabajó arduamente e incluso en la actualidad se trabaja para obtener instrumentos de medición precisos y cumplir con los requisitos de los clientes.

La industria crece cada día, involucrando un sinnúmero de procesos materia prima. Existen procesos sencillos y otros complejos. Cuando un proceso es más complejo, es más difícil determinar el estado de la variable que se está

procesando por lo que se utilizan instrumentos para conocer las condiciones en las que se encuentra la materia a medida que avanza en este.

A base de sensores que tratan de la mejor manera igualar facultades humanas se construyen sistemas con instrumentos para monitorear el proceso. Conjunto con otros elementos; válvulas, motores, etc., se puede llegar a controlar un proceso completo y hacer que este funcione automáticamente. Para automatizar un proceso se necesita de un cerebro que interprete los datos censados por los instrumentos y accione los elementos finales de control. Existen dos tipos de controladores industriales; el Controlador Lógico Programable, y el Sistema de Control Distribuido, PLC y DCS por sus siglas en inglés respectivamente.

El PLC es un equipo electrónico, programable en lenguaje no informático, diseñado para controlar en tiempo real y en ambiente de tipo industrial, procesos secuenciales. Un PLC trabaja en base a la información recibida por los captadores y el programa lógico interno, actuando sobre los accionadores de la instalación.

El DCS es un control digital realizado distribuyendo el riesgo del control único por ordenador en varios controladores o tarjetas de control de tipo universal con algoritmos de control seleccionables por *software*. Los transmisores electrónicos de campo, las tarjetas de control y la estación del operador están unidos mediante una vía de comunicaciones en forma de cable coaxial y cada componente se ubica en el lugar más idóneo de la planta.

De cualquier forma ningún dispositivo ha sido inventado que pueda competir contra el ojo humano para la precisión y certeza en muchas tareas; tampoco el oído humano. Cualquier ser humano puede identificar y distinguir

mayor cantidad de esencias que cualquier dispositivo automático. Las habilidades para el patrón de reconocimiento humano, se encuentran más allá de cualquier expectativa de los ingenieros de automatización.

1.2. Definiciones importantes de instrumentación

Antes de iniciar la descripción de los términos instrumentación automatización, es importante conocer la terminología que se aplica en estas ramas. A continuación, se describirán algunos conceptos básicos que serán de importancia para la comprensión del presente trabajo.

1.2.1. Partes de un sistema de control

Un sistema de control está compuesto por gran cantidad de dispositivos, por lo cual, para facilitar la descripción se hará una simplificación de las unidades para conocer únicamente la función que tiene cada una, sin entrar a detalle de su composición específica.

1.2.1.1. Controlador

Consiste en un *hardware* que se programa por medio de software, que compara la variable controlada y ejerce automáticamente una acción de corrección, de acuerdo con la desviación.

1.2.1.2. Sistema automatizado

La automatización es un sistema donde se transfieren tareas de producción, realizadas habitualmente por operadores humanos a un conjunto de elementos tecnológicos. Consta de dos partes:

1.2.1.2.1. Parte de mando

Parte que actúa directamente sobre la máquina. Son los elementos que hacen que la máquina se mueva y realice la operación deseada. Los elementos que forman la parte operativa son los actuadores de las máquinas como motores, cilindros, compresores entre otros, y los captadores como fotodiodos, finales de carrera, etc.

1.2.1.2.2. Parte operativa

Suele ser un autómata programable, aunque hasta hace poco se utilizaban relés electromagnéticos, tarjetas electrónicas o módulos lógicos neumáticos. En un sistema de fabricación automatizado el autómata programable esta en el centro del sistema. Este debe ser capaz de comunicarse con todos los constituyentes de sistema automatizado.

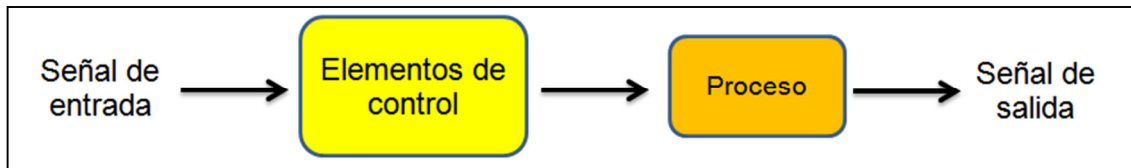
1.2.1.3. Convertidor

Instrumento utilizado como interfaz en un proceso. Este recibe una señal estándar, la procesa y la envía de forma modificada; este procedimiento se realiza para que la señal de salida pueda ser interpretada por la siguiente etapa que compone el sistema automatizado.

1.2.1.4. Lazo abierto de control

Es aquel sistema en que solo actúa algún proceso sobre la señal de entrada, y da como resultado una señal de salida independiente a la señal de entrada; es la señal de entrada procesada.

Figura 1. **Lazo de control abierto**

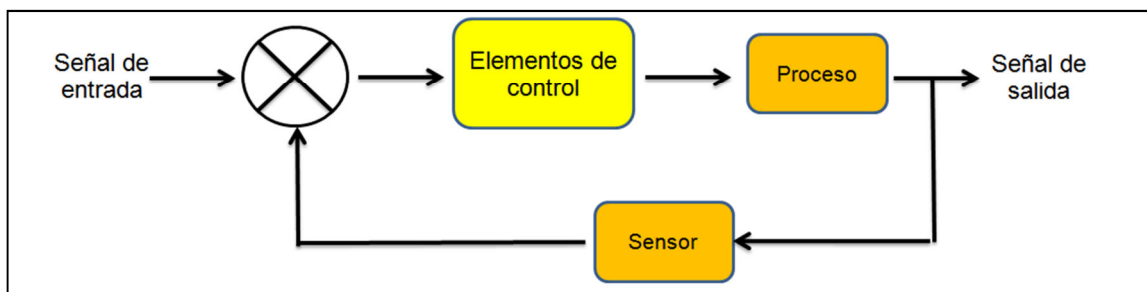


Fuente: www.wikipedia.com. Consulta diciembre de 2011.

1.2.1.5. **Lazo cerrado de control**

Camino que sigue la señal desde el controlador hacia la válvula, al proceso y realimentándose a través del transmisor hacia un punto de suma con el punto de consigna. La ventaja primordial del lazo cerrado es que se autorregula, esto se logra a través del sensor, este realimenta a la entrada la señal de salida. El comparador relaciona las dos señales, a manera que esta va marcando el paso de los elementos de control, la variable de salida llega a un *set point* deseado y el lazo se estabiliza.

Figura 2. **Lazo de control cerrado**



Fuente: www.wikipedia.com. Consulta diciembre de 2011.

1.2.1.6. Tendencia

Registro del comportamiento de una variable, como su nombre lo indica, sufre una sucesión de cambios en su valor aritmético. Se le llama tendencia a los valores registrados del comportamiento de una variable monitoreada.

1.2.1.7. Elemento final de control

Instrumento que recibe y responde a la magnitud de la señal del controlador y modifica el caudal del fluido o agente de control. Por lo regular, una válvula es el elemento final de control. Recibe la señal del controlador y modifica el caudal del fluido o agente de control.

1.3. Definición transferencia de custodia

Transferencia: acción de transferir, mover o pasar una cosa de un lugar a otro.

Custodia: guardar algo con sumo cuidado.

Si tratamos de definir Transferencia de Custodia a partir de los significados individuales de las palabras que la conforman podemos llegar a un concepto tanto acertado. Un punto de transferencia de custodia es un lugar de medición en donde el fluido está siendo medido para la venta al consumidor, de esto se desprende el nombre "Transferencia de Custodia". La medida de transferencia de custodia es distinta a algunos otros tipos de medida debido a la naturaleza contractual del instrumento medidor.

Un organismo regulador reconocido ha sido establecido en la mayor parte de jurisdicciones, tales regulaciones dictan provisiones de antifraude y especificaciones en cuanto a precisión mínima y exactitud. En Canadá, toda medición de naturaleza de transferencia de custodia es supervisada por Measurement Canadá. En Estados Unidos, Federal Energy Regulatory Commission (FERC) controla los estándares que deben cumplirse para el comercio entre estados.

La medición de transferencia de custodia de fluidos es el tipo de medición que está asociado con la compra, venta y pago de impuesto de un producto determinado. El propósito de la medición de transferencia de custodia de fluidos es llevar a cabo mediciones con un error sistemático igual a cero y un error aleatorio mínimo.

De acuerdo con la International Organization of Legal Metrology (OIML) en la norma OIML R-117, se presenta la clasificación y límites de precisión permisible para equipos ubicados en áreas clasificadas para custodia y transferencia de combustibles.

Los equipos para aplicaciones de custodia y transferencia necesitan un certificado expedido por una autoridad de verificación acreditada como prueba de su fiabilidad, exactitud y seguridad.

La tabla I muestra las clases de exactitud tomando en consideración la aplicación del sistema de medición:

Tabla I. **Clases de exactitud de acuerdo a OIML R-117**

CLASE	CAMPO DE APLICACIÓN
0,3	Sistemas de medición instalados en tuberías
0,5	Bombas de despacho de gasolina Sistemas de medición instalados en auto-tanques Sistemas de medición para leche Sistemas de medición para buque-tanques
1,0	Sistemas de medición para gases licuados (diferentes a los gases licuados del petróleo, LPG), sujetos a presión y a temperaturas mayores que -10 °C Sistemas de medición de LPG para carga de vehículos Sistemas de medición clasificados como 0,3 ó 0,5 bajo las siguientes condiciones <ul style="list-style-type: none"> • Con temperaturas menores que -10 °C ó mayores que 50 °C • Con fluidos cuya viscosidad dinámica sea mayor que 1 000 mPas • Con flujo menor que 20 Lt/h
1,5	Sistemas de medición para dióxido de carbono licuado Sistemas de medición para gases licuados (diferentes a los gases licuados del petróleo, LPG), sujetos a presión y a temperaturas mayores que -10 °C
2,5	Sistemas de medición para líquidos criogénicos

Fuente: BORJA SALAZAR, Daniel Patricio. *Diseño de un sistema de medición y control de uso de combustibles para las centrales de generación termoeléctrica del S.N.I. p. 35.*

La tabla II muestra los errores máximos permisibles aplicables a sistemas de medición completos, para todos los líquidos, todas las presiones y temperaturas de los líquidos y los fluidos.

Tabla II. **Errores máximos permisibles de acuerdo a la clase de exactitud, según OIML R-117**

Clases según la exactitud					
	0,3	0,5	1,0	1,5	2,5
A	± 0,3 %	± 0,5 %	± 1,0 %	± 1,5 %	± 2,5 %
B	± 0,2 %	± 0,3 %	± 0,6 %	± 1,0 %	± 1,5 %

Fuente: BORJA SALAZAR, Daniel Patricio. *Diseño de un sistema de medición y control de uso de combustibles para las centrales de generación termoeléctrica del S.N.I. p. 45.*

2. ELEMENTOS DE SISTEMAS PARA TRANSFERENCIA DE CUSTODIA: INSTRUMENTOS, EQUIPOS Y PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN

2.1. Instrumentos

Son una parte fundamental para el proceso de transferencia de custodia. Sin ellos, fuera imposible determinar con exactitud, las cantidades que se despachan a clientes o se almacenan en tanques de inventario.

2.1.1. Caudalímetros

Instrumento empleado para la medición del caudal de un fluido o gasto másico. Estos aparatos suelen colocarse en línea con la tubería que transporta el fluido. También suelen llamarse medidores de caudal, medidores de flujo o flujómetros.

2.1.1.1. Turbina

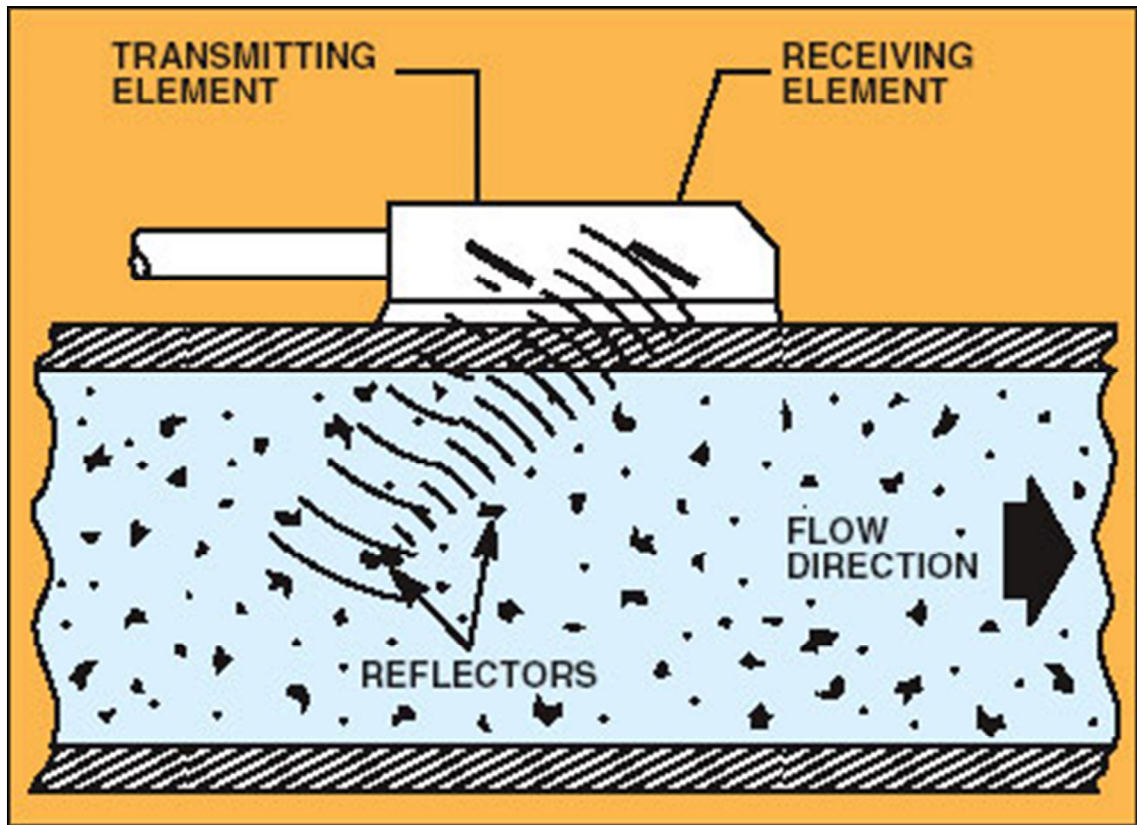
Este medidor tiene un cuerpo de forma cilíndrica, en el interior del cual se monta un rotor helicoidal, que puede girar libremente. La circulación de un fluido, choca contra las palas de rotor imprimiéndole una velocidad de giro, que es proporcional a la velocidad del fluido y consecuentemente a su volumen. Para determinar el número de revoluciones de la turbina el medidor consta de un dispositivo captador magnético que genera un impulso eléctrico cada vez que un álabe de la turbina pasa frente a él dentro de una amplia gama de caudales y viscosidades.

2.1.1.2. Ultrasonico

Un caudalímetro ultrasónico es un medidor de flujo volumétrico que requiere partículas o burbujas en el fluido a medir. Estos son ideales en aguas de desechos o en algún líquido sucio que es conductivo o basado en agua. Los caudalímetros ultrasónicos generalmente no brindan resultados deseados en agua destilada o agua potable; aireadores son fundamentales en aplicaciones de agua limpia. Son funcionales en aplicaciones de baja caída de presión, compatibilidad química y bajo mantenimiento.

El principio de operación se basa en el Efecto Doppler, entiéndase; un cambio de frecuencia de una señal ultrasónica cuando ésta es reflejada por partículas o burbujas de gas en movimiento. Esta técnica de medición utiliza el fenómeno físico de una onda sonora que cambia su frecuencia cuando es reflejada por discontinuidades en movimiento de un líquido fluyendo. El sonido ultrasónico es transmitido en una tubería con líquido en movimiento, y las discontinuidades reflejan la onda ultrasónica con un ligero cambio de frecuencia directamente proporcional a la cantidad de flujo moviéndose dentro de ella. La tecnología actual requiere que el líquido contenga al menos 100 partes por millón de 100 micron o más partículas suspendidas de burbujas.

Figura 3. **Funcionamiento de un medidor ultrasónico**

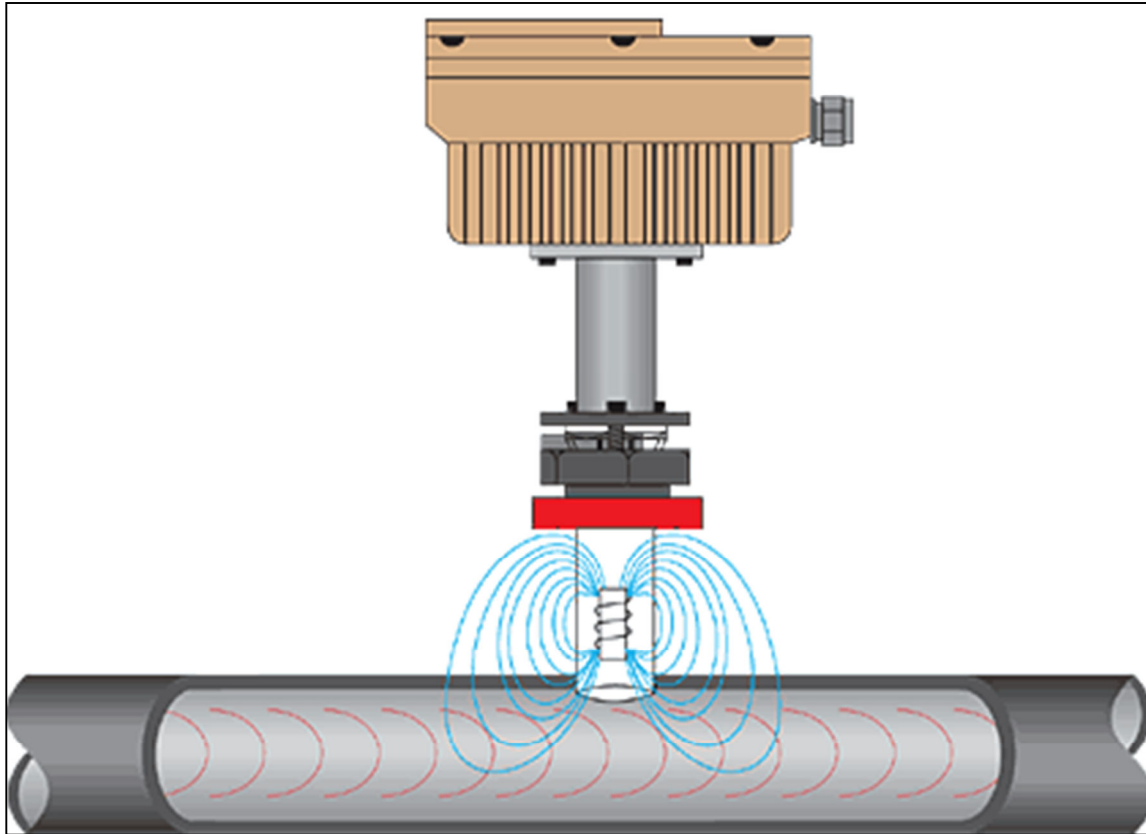


Fuente: www.wikipedia.com. Consulta enero de 2012.

2.1.1.3. **Magnético**

Un caudalímetro magnético es un medidor de flujo volumétrico que no contiene partes móviles, ideal para aplicaciones de agua de desecho y líquidos sucios los cuales son conductivos y basados en agua. Los caudalímetros magnéticos generalmente no funcionan con hidrocarburos, agua destilada y soluciones no acuosas. Estos son ideales para aplicaciones de baja caída de presión y bajo mantenimiento.

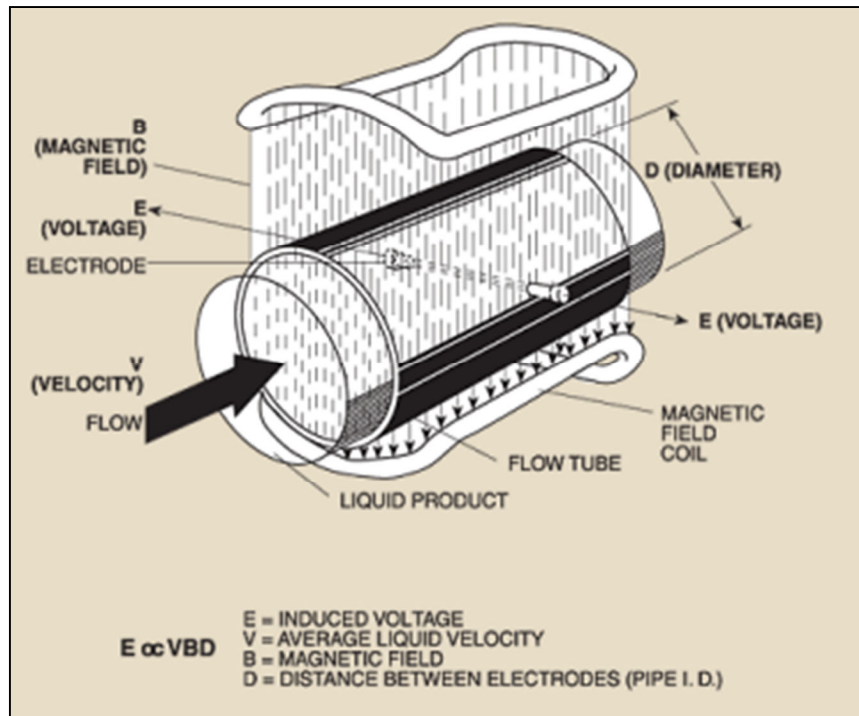
Figura 4. **Funcionamiento de un caudalímetro magnético**



Fuente: www.wikipedia.com. Consulta enero de 2012.

La operación de un caudalímetro magnético, se basa en la Ley de Faraday, la cual establece que el voltaje inducido a sobre un conductor a cierta inclinación formando un ángulo a través de un campo magnético es proporcional a la velocidad del conductor.

Figura 5. Ejemplificación de la ley de Faraday en un caudalímetro magnético



Fuente: www.wikipedia.com. Consulta enero de 2012.

La fórmula de Faraday es la siguiente:

$$E = K \cdot V \cdot B \cdot D \quad (\text{ec. 2.1})$$

E = Voltaje generado en un conductor

V = Velocidad del conductor

B = Magnitud del campo magnético

D = Longitud del conductor (distancia entre electrodos)

K = Constante de proporcionalidad

Para aplicar este principio a la medición de flujo es necesario establecer que el fluido a medir sea eléctricamente conductivo para poder aplicar la Ley de Faraday. La Ley de Faraday dice que la señal de voltaje E depende de la velocidad promedio del líquido, la magnitud del campo magnético B y la distancia D entre los electrodos que generan el campo magnético. En el caso de que sea un caudalímetro por conexión entre bridas, el campo magnético se aplica en toda el área transversal del tubo que atraviesa el fluido. Si consideramos el campo magnético como el elemento medidor del caudalímetro magnético, podemos observar que el elemento sensor está expuesto a condiciones hidráulicas en toda su sección transversal.

2.1.1.4. Coriolis

Los caudalímetros másicos, son la base para la elaboración de recetas, determinación de balance de materiales, facturación y operaciones transferencia de custodia en la industria. Siendo esta la medición de flujo más crítica en el proceso de cierta planta, es de suma importancia la fiabilidad y la precisión de la masa que fluye.

Este medidor se basa en el teorema de Coriolis. Un objeto que se desplaza con una velocidad a través de una superficie giratoria que gira con velocidad angular constante, experimenta una velocidad tangencial tanto mayor cuanto mayor es su alejamiento del centro. Si el objeto móvil se desplaza del centro hacia la periferia experimentara un aumento gradual de su velocidad tangencial, lo cual indica que se le está aplicando una aceleración y, por tanto, una fuerza sobre su masa. A medida que el radio de giro va aumentando gradualmente, la velocidad tangencial también varía, con lo que se concluye que una variación de velocidad comporta una aceleración, la que a su vez es debida a una fuerza que actúa sobre la bola.

Figura 6. Funcionamiento de un caudalímetro tipo Coriolis

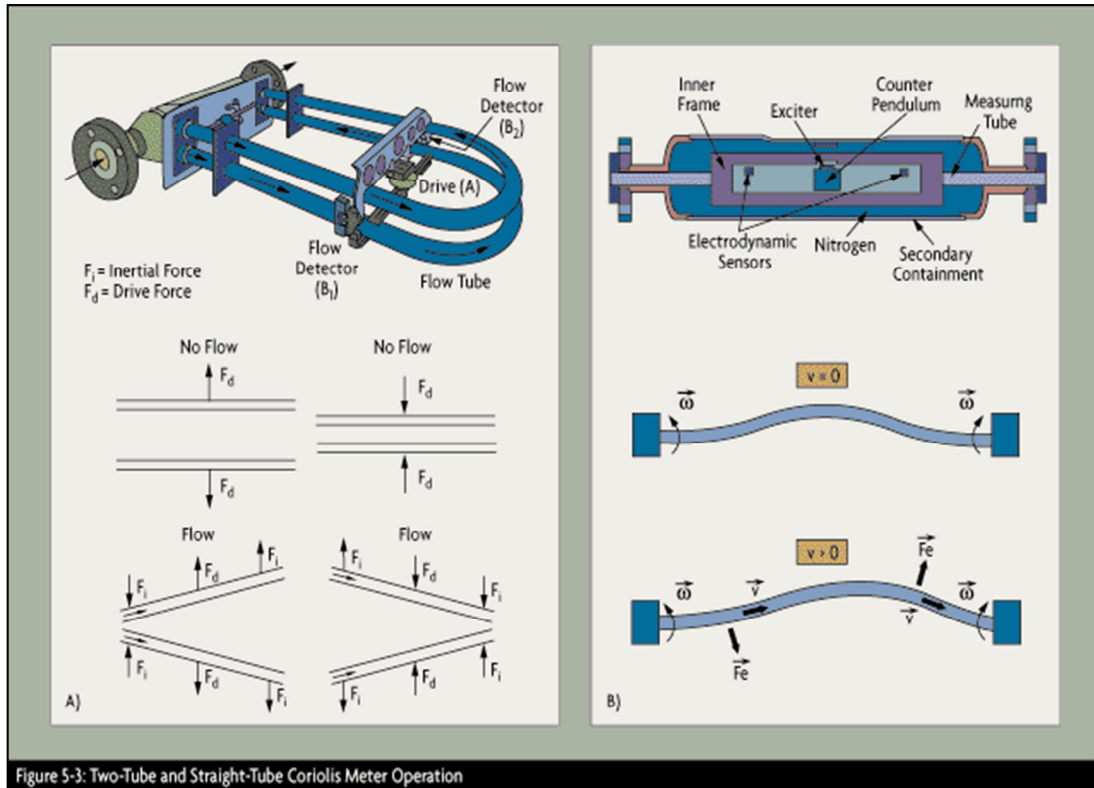


Figure 5-3: Two-Tube and Straight-Tube Coriolis Meter Operation

Fuente: www.wikipedia.com. Consulta enero de 2012.

Por ejemplo, situando una bola de acero en un disco giratorio lleno de grasa, que actúa como freno, en su parte superior, y haciéndolo girar, la bola describe una línea curva hasta salir del disco. Durante su recorrido, tiene una velocidad tangencial igual a la velocidad angular del disco multiplicada por la distancia al centro de giro. Esta velocidad tangencial va aumentando a medida que la bola se aleja del centro del disco, lo que, tal como se ha dicho evidencia la existencia de una aceleración, y por lo tanto de una fuerza. Este fenómeno es el causante de que el remolino que se forma en el fondo de un depósito al vaciarlo, gira a derechas en el hemisferio norte y a izquierdas en el hemisferio sur.

Figura 7. Interior de un caudalímetro tipo Coriolis

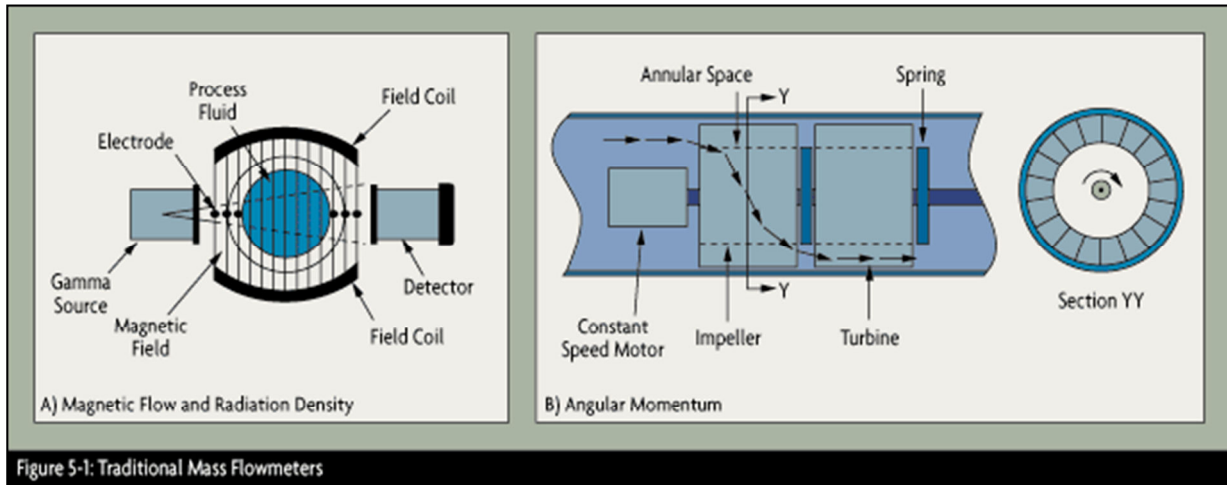


Figure 5-1: Traditional Mass Flowmeters

Fuente: www.wikipedia.com. Consulta enero de 2012.

2.1.1.5. Desplazamiento positivo

Estos separan el líquido en porciones que llenan un recipiente mientras se desplaza. Después cada porción es contada para medir el caudal. Existen muchas variantes de este sistema. De tornillo, de engranajes, pistones, etc.

Figura 8. **Imagen de interior caudalímetro de tipo desplazamiento positivo**



Fuente: www.wikipedia.com. Consulta enero de 2012.

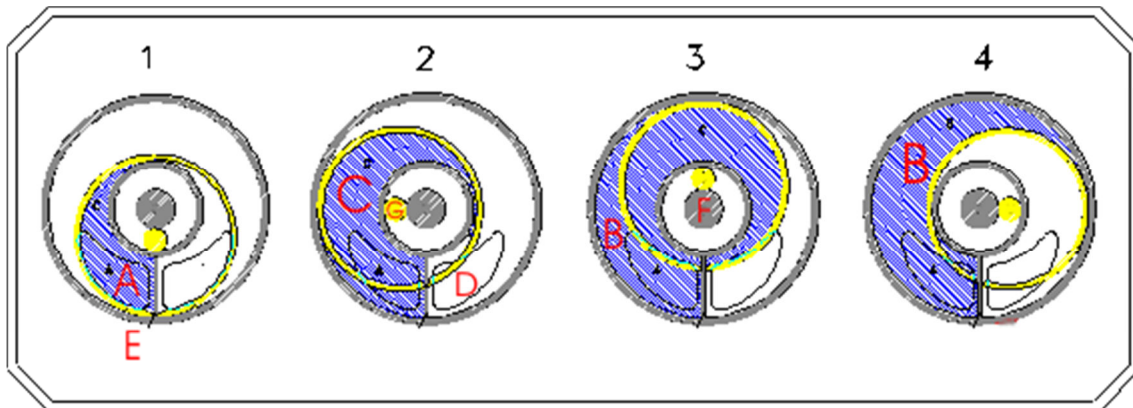
El sistema de engranajes consiste en dos engranajes encontrados que hacen un sello perfecto, el fluido debe circular entre los dos engranajes forzándolos a girar. Es movimiento se puede medir de forma electrónica o mecánica.

Cada uno de los engranajes tiene un imán permanente que se usa para enviar información a la parte electrónica del equipo, se instala arriba mediante tornillos, y se detecta el paso del imán mediante un interruptor.

El medidor de desplazamiento por pistones es un poco más complejo. El agua entra por el puerto A y comienza a desplazar el pistón amarillo mientras

llena el espacio C. El agua que sigue entrando ahora llena el espacio B y sigue forzando al pistón amarillo a girar hasta que el agua que ocupaba el espacio C sale por el puerto D. Posteriormente el agua que ocupa el espacio B igualmente saldrá por el puerto D al momento de comenzar otro ciclo. El agua entre los puertos de entrada y salida (A y D) está aislada por la barrera E. La oscilación del pistón G (magnético) traza un círculo que rodea al eje F. Un medidor de campo colocado fuera del caudalímetro mide estas oscilaciones y las convierte en pulsos.

Figura 9. **Funcionamiento de un caudalímetro de tipo desplazamiento positivo**



Fuente: www.wikipedia.com. Consulta enero de 2012.

2.1.1.6. V-Cone

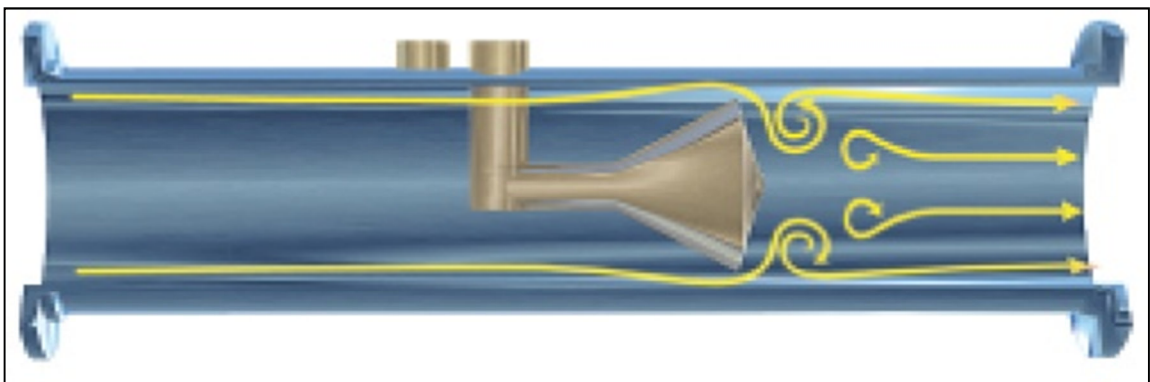
El medidor de flujo de presión diferencial V-Cone es una tecnología patentada de medición de flujos con alta precisión, aplicable a gran variedad de fluidos, todo tipo de condiciones y un amplio intervalo de números de Reynolds. Utiliza el mismo principio físico que otros medidores de flujo de presión diferencial: el teorema de conservación de la energía del flujo de fluidos a través

de una tubería. No obstante, las características notables de desempeño del V-Cone son el resultado de su exclusivo diseño, que incluye un cono central en el interior del tubo.

El cono interactúa con el flujo del fluido, modificando su perfil de velocidad para crear una región de presión más baja inmediatamente aguas abajo del cono. La diferencia entre la presión estática de la línea y la presión más baja creada aguas abajo del cono se mide a través de dos tomas piezosensibles. Una de las tomas se coloca inmediatamente aguas arriba del cono y la otra se coloca en la cara orientada aguas abajo. Después, la diferencia de presión se puede incluir en una derivada de la ecuación de Bernoulli para determinar el régimen de flujo.

La posición central del cono en la línea optimiza el perfil de velocidad del flujo en el punto donde se hace la medición, asegurando mediciones de flujo altamente precisas y confiables, sin importar la condición del flujo aguas arriba del medidor.

Figura 10. **Imagen interior de un caudalímetro tipo V-cone**



Fuente: DEVINE, Peter. *Radar measurement, the user's guide*. p. 33.

2.1.2. Medidor de nivel

Dentro de los procesos industriales la medición y el control de nivel se hace necesario cuando se pretende tener una producción continua, cuando se desea mantener una presión hidrostática, cuando un proceso requiere de control y medición de volúmenes de líquidos o; bien en el caso más simple, para evitar que un líquido se derrame, la medición de nivel de líquidos, dentro de un recipiente parece sencilla, pero puede convertirse en un problema más o menos difícil, sobre todo cuando el material es corrosivo o abrasivo, cuando se mantiene a altas presiones.

Cuando es radioactivo o cuando se encuentra en un recipiente sellado en el que no conviene tener partes móviles o cuando es prácticamente imposible mantenerlas, el control de nivel entre dos puntos, uno alto y otro bajo, es una de las aplicaciones más comunes de los instrumentos para controlar y medir el nivel, los niveles se pueden medir y mantener mediante dispositivos mecánicos de caída de presión, eléctricos y electrónicos.

Los instrumentos mecánicos de medición y control de niveles o cargas hidrostáticas, incluyen dispositivos visuales e indicadores, el dispositivo más simple para medir niveles es una varilla graduada, que se pueda insertar en un recipiente, la profundidad real del material se mide por la parte mojada de la varilla, este método es muy utilizado para medir el nivel en los tanques de una gasolinera, este método es simple pero efectivo, no es muy práctico, sobre todo si el material es tóxico o corrosivo, ya que el individuo que lo aplica tiene que estar de pie sobre la abertura manejando la varilla con las manos.

En la industria, la medición de nivel es muy importante, tanto desde el punto de vista del funcionamiento correcto del proceso como de la

consideración del balance adecuado de materias primas o de productos finales. Los instrumentos de nivel pueden dividirse en medidores de nivel de líquidos y de sólidos que son dos mediciones claramente diferenciadas por sus distintas peculiaridades y las aplicaciones particulares de las que son objeto.

La utilización de instrumentos electrónicos con microprocesador en la medida de otras variables, tales como la presión y la temperatura, permite añadir “inteligencia” en la medida de nivel, y obtener precisiones de lectura altas, del orden de $\pm 0,2$ por ciento, en el inventario de materias primas o finales o en transformación en los tanques de los procesos.

El transductor de nivel inteligente (evaluación experimental de un esquema de regulación del nivel de un tanque basado en redes neuronales), hace posible la interpretación del nivel real elimina o compensa la influencia de la espuma en flotación del tanque en la lectura, la eliminación de falsas alarmas, tanques con olas en la superficie debido al agitador de paletas en movimiento, y la fácil calibración del aparato en cualquier punto de la línea de transmisión.

2.1.2.1. Servomecanismo

Este instrumento mide de forma continua la tensión de un hilo del que pende un contrapeso, en forma de disco. El sistema está en equilibrio cuando el contrapeso tiene un ligero contacto con el líquido. Al cambiar el nivel del líquido, varía la tensión del hilo lo que es detectado por un servoposicionador, éste tiende a restituir el equilibrio de tensiones subiendo o bajando el contrapeso. Posee una gran precisión de hasta 1 milímetro con alta repetitividad y sensibilidad.

Hay versiones de estos equipos para tanques atmosféricos, esferas de GLP (Gas Licuado de Petróleo) a presión, y de acero inoxidable para la industria alimenticia.

2.1.2.2. Radar

Este instrumento basa su principio de funcionamiento en la medición del tiempo de retorno de un impulso de microondas de radar (Radio Detecting And Ranging, Detección y Localización por Radio).

Una antena dirige impulsos cortos de microondas de 0,8 nanosegundos de duración hacia el producto. Estos se reflejan en su superficie y la misma antena los detecta a su regreso, esta vez actuando como receptor. La distancia a la superficie del producto es proporcional al tiempo de retorno del impulsor de microondas.

2.2. Protocolos de comunicación

La comunicación del elemento final de control y el instrumento con el controlador es indispensable. Al final, este depende de la información que el instrumento le envía para controlar el elemento final de control. La manera de cómo se comuniquen, dependerá de factores como distancia, tipos de cable, cantidad de información que se envía, etc. Dependiendo las combinaciones de los factores anteriores, existen varios protocolos de comunicación que cubren con las necesidades específicas para manejar la comunicación de la manera más eficiente.

2.2.1. Foundation fieldbus

Foundation Fieldbus (FF) es un protocolo de comunicación digital para redes industriales, específicamente utilizado en aplicaciones de control distribuido. Puede comunicar grandes volúmenes de información, ideal para aplicaciones con varios lazos complejos de control de procesos y automatización. Está orientado principalmente a la interconexión de dispositivos en industrias de proceso continuo. Los dispositivos de campo son alimentados a través del bus Fieldbus cuando la potencia requerida para el funcionamiento lo permite.

2.2.2. Profibus

(Process Field Bus) Norma internacional de bus de campo de alta velocidad para control de procesos normalizada en Europa por EN 50170.

Existen tres perfiles:

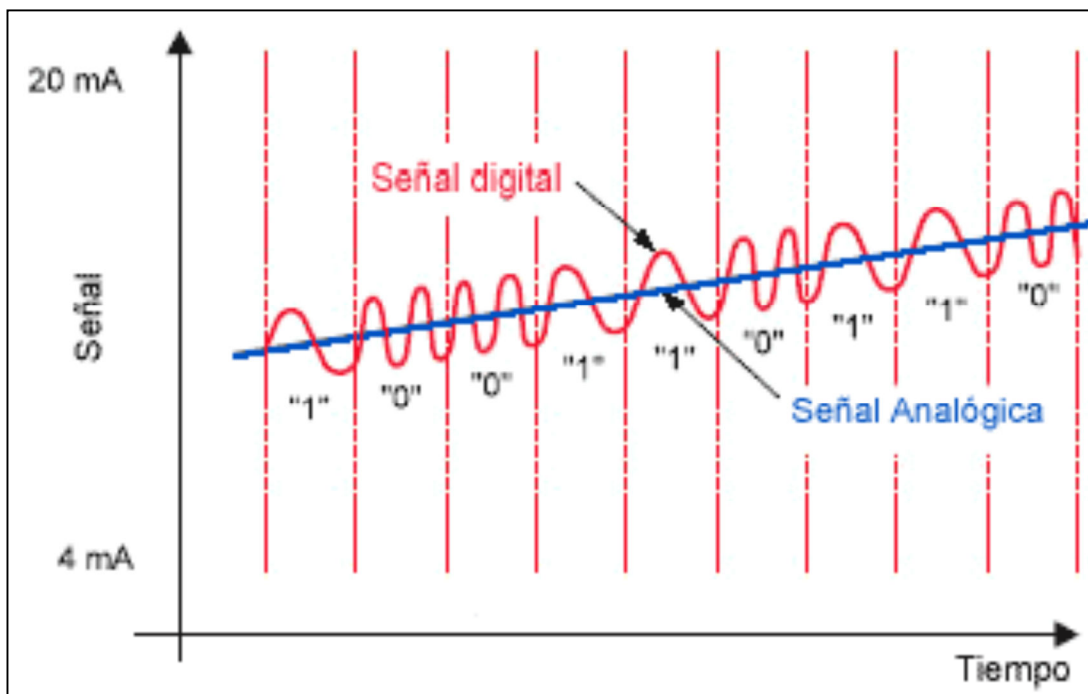
- *Profibus* DP (Decentralized Periphery). Orientado a sensores y actuadores enlazados a procesadores PLC's o terminales.
- *Profibus* PA (Process Automation). Para control de proceso, cumple normas especiales de seguridad para la industria química IEC 1 1 15 8-2, seguridad intrínseca.
- *Profibus* FMS (Fieldbus Message Specification). Para comunicación entre células de proceso o equipos de automatización.

2.2.3. HART (Highway Addressable Remote Transducer)

El protocolo HART (High way-Addressable Remote-Transducer) agrupa la información digital sobre la señal analógica típica de 4 a 20 miliamperios DC. La señal digital usa dos frecuencias individuales de 1 200 y 2 200 hertz, que representan los dígitos 1 y 0 respectivamente y que en conjunto forman una onda sinusoidal que se superpone al lazo de corriente de 4-20 miliamperio.

Como la señal promedio de una onda sinusoidal es cero, no se añade ninguna componente DC a la señal analógica de 4-20 miliamperios, lo que permite continuar utilizando la variación analógica para el control del proceso.

Figura 11. Gráfico del comportamiento del protocolo HART



Fuente: DEVINE, Peter. *Radar measurement, the user's guide*. p. 46.

Tabla III. Cuadro comparativo de protocolos de comunicación

Nombre	Topología	Soporte	Dispositivos máximos	Rate Trans. Bps	Distancia max. Km	Comunicación
Profibus DP	Línea, estrella y anillo	Par trenzado fibra optica	127/segm	Hata 1.5M y 12M	0,1 segm	Master/slave peer to peer
Profibus DP	Línea, estrella y anillo	Par trenzado fibra optica	14 400/segm	31.5K	0,1 segm 24 fibra	Master/slave peer to peer
Profibus DP		Par trenzado fibra optica	127/segm	500K		Master/slave peer to peer
Foundation Fieldbus HSE	Estrella	Par trenzado fibra optica	240p/segm 32,768 sist	100M	0,1 par 2 fibra	Single/multimaster
Foundation Fieldbus H1	Estrella o bus	Par trenzado fibra optica	240p/segm 32,768 sist	31.25K	1.9 cable	Single/multimaster
HART		Par trenzado	15 p/segm	1.2K		Master/slave
Ethernet industrial	Bus, estrella, malla-cadena	Coaxial Par trenzado fibra optica	400 p/segm	10, 100M	0,1 100 mono c/switch	Master/slave peer to peer

Fuente: www.wikipedia.com. Consulta enero de 2012.

Algunas ventajas de utilizar protocolos de comunicación son:

- Posibilidad de intercambio de información entre equipos que controlan fases sucesivas de un mismo proceso.
- Facilidad de comunicación hombre máquina.
- Uso de una base de datos común.

3. APLICACIÓN: MEDICIÓN DE NIVEL DE UN TANQUE DE ALCOHOL ETÍLICO; CARACTERÍSTICAS Y FACTORES A CONSIDERAR UTILIZANDO INSTRUMENTOS CON TECNOLOGÍA RADAR

3.1. Descripción

En la industria existe una gran diversidad de materias primas, estas materias sometidas a condiciones controladas se convierten en un producto final. Dependiendo de la complejidad del proceso o procesos a los que se sometió la materia prima, el costo del producto final puede ser bajo o muy alto; por consiguiente si el producto final tiene un alto costo y vamos a venderlo, es vital conocer con certeza la cantidad de producto que se está despachando a los clientes.

Podemos monitorear el contenido de un tanque de almacenamiento con un instrumento de medición de nivel, pero, ¿Cómo llegamos a tener un dato certero sobre la cantidad de producto? Existe una amplia gama de medidores, diferentes principios físicos implementados para el mismo fin. Obviamente no todos los principios reflejan el mismo resultado, algunos métodos son más sencillos de implementar que otros y esto es proporcional al precio del equipo; mientras más complicado de fabricar el equipo, más costoso se vuelve pero al igual que el costo, incrementa su precisión y repetitividad.

Por ejemplo, un instrumento que utiliza el método de presión diferencial no posee la precisión de un instrumento ultrasónico y un instrumento ultrasónico no posee la precisión de un instrumento de tipo radar.

En una Planta Destiladora existían instrumentos de presión absoluta que indicaban el nivel del producto en unos tanques de almacenamiento y se usaba una varilla para medir físicamente el nivel del tanque. Según la medida que indicara la varilla se procedía a las tablas de calibración del tanque para conocer el volumen del producto en litros. La precisión de los instrumentos de presión absoluta se queda corta cuando se desea conocer el valor real del contenido, esta es fiable cuando solo se necesita una referencia del nivel. Por este motivo se instalaron medidores de nivel que tuvieran un error mínimo, certificados para transferencia de custodia de tecnología radar; para conocer con certeza el contenido del contenedor.

3.2. Características de la aplicación: ventajas competitivas y desventajas

Como toda implementación, tiene ventajas y desventajas. Se buscó desarrollar instrumentos basados en distintas tecnologías para solventar la problemática que se ha presentado en los diversos ambientes industriales a los que se han sometido.

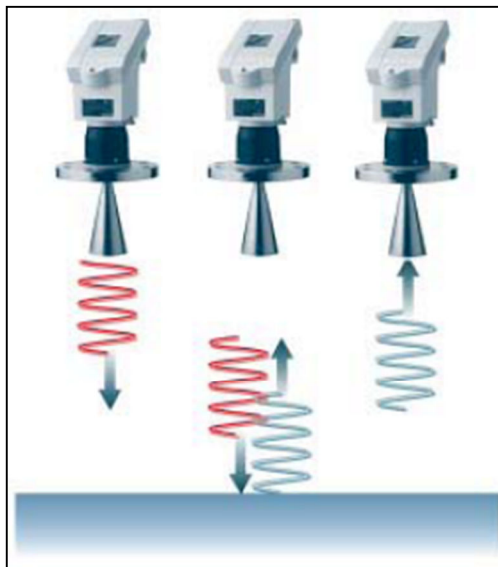
3.2.1. Características de aplicación: medición de nivel con instrumentos de tecnología RADAR

La palabra radar es una abreviatura de la frase “Radio Detection And Ranging”, que significa en español detección y medición de distancias por radio. Es un sistema que usa ondas electromagnéticas para medir distancias,

altitudes, direcciones y velocidades de objetos estáticos o móviles como aeronaves, barcos, vehículos motorizados, formaciones meteorológicas y el propio terreno. Su funcionamiento se basa en emitir un impulso de radio, que se refleja en el objetivo y se recibe típicamente en la misma posición del emisor. La información se extrae a base de este “eco”. El uso de ondas electromagnéticas permite detectar objetos más allá del rango de otro tipo de emisiones como luz visible, sonido, etc.

Los sensores tipo radar están constituidos por un transmisor, una antena, un receptor, un procesador de señales y una interfaz de operación. Un oscilador se encarga de enviar una onda electromagnética (utilizando otra onda como portadora) hacia abajo apuntando a la superficie del producto que se desea monitorear. Una porción de esta es reflejada de vuelta a la antena, donde la información es interpretada por el instrumento.

Figura 12. **Transmisor de nivel tipo radar**



Fuente: www.enraf.ru/userfiles/File/4416650_rev4.pdf. Consulta noviembre 2011.

Existen dos principios de operación para la medición continua de nivel utilizando instrumentos tipo radar:

- FMCW
- Pulse radar

La tecnología Onda Continúa Modulada en Frecuencia, FMCW por sus siglas en inglés, emite continuamente una señal a determinada frecuencia y la distancia es inferida por la diferencia de frecuencia de la onda. La modulación en frecuencia varía de los 0 a los 200 Hertz a medida que la distancia varía entre 0 y 200 pies. Esta técnica a pesar de ser inferida, tiene una precisión muy alta y es la técnica ideal para la demanda de alta precisión y transferencia de custodia. Debido a que la medida se obtiene en el dominio de la frecuencia, es altamente libre de interferencia por ruido.

Otros medidores de nivel, particularmente de menor costo operan con el principio de impulsos. Ambos principios se basan fundamentalmente en el tiempo de vuelo de la onda electromagnética (partida del transmisor y regreso al mismo). En el método de modulación en frecuencia, el tiempo de vuelo es monitoreado sobre la onda portadora. En el método de impulsos, se mide el tiempo directamente en que el eco tarda en retornar al emisor. Este último es un análogo al principio del sonar, es cómo funcionan los medidores ultrasónicos con la salvedad que los de tipo radar usan una banda de frecuencias entre los 6 y 28 Gigahertz y no frecuencias ultrasónicas acústicas.

Un instrumento de nivel de tipo radar se caracteriza por lo siguiente:

3.2.1.1. Precisión

Instrumentos de tipo radar son capaces de una precisión excepcional, esta puede llegar a ser de 1,02 milímetros, ideales para medición de inventario. Debido a la técnica de medición del radar (medida del nivel de superficie), el porcentaje de precisión se incrementa a medida que el span aumenta; para un contenedor de 3,8 metros de alto, las 0,04 pulgadas equivalen a una precisión del 0,01 por ciento del span. Cuando se utiliza el instrumento radar con una tabla de calibración y un caudalímetro de tipo Coriolis para la densidad en una línea de recirculación, el dispositivo radar es capaz de brindar casi perfectos resultados para la medida de volumen o masa conjuntamente con la medición de nivel.

3.2.1.2. Diversidad de ambiente

Las ondas electromagnéticas son emitidas a través del aire libre, no necesitan medio de transmisión; conductor, vapor, etc. Pueden ser utilizados en aplicaciones de atmósferas peligrosas inflamables.

3.2.1.3. Alto rango de medición

Este instrumento cuenta con un amplio rango de medición, logra una lectura del nivel de algún contenedor que mida hasta 35 metros. Puede ser utilizado en aplicaciones a alta temperatura y a alta presión.

3.2.1.4. Durabilidad

Los materiales con los que se fabrican estos equipos son de alta calidad, muy resistentes por los ambientes a los que están sometidos. El material se selecciona según el proceso al que esté sometida la variable monitoreada.

3.2.1.5. Fácil de utilizar

Fácil de parametrizar, contiene teclas para configuración. No es necesario vaciar y llenar el tanque para la calibración. Soporta los protocolos de comunicación hart y foundation fieldbus.

3.2.1.6. Diversidad de aplicaciones

El medidor de nivel tipo radar, debido a su tecnología, puede emplearse en la mayoría de aplicaciones; monitoreando sólidos y líquidos. Puede utilizarse también en instalaciones intrínsecamente seguras; monitoreo de etanol y derivados del petróleo.

3.2.1.7. Medición en líquidos

La tecnología radar puede medir nivel de casi cualquier líquido. Cuando el líquido a medir es buen conductor de la electricidad, la reflexión de las ondas no es buena y crea gran atenuación en la misma; esto crea dificultad para que el transmisor radar interprete el nivel adecuado. Mientras menos conductor eléctrico es (la constante dieléctrica es mayor a las del aire "1,0"), la onda electromagnética se refleja mejor y obtenemos una mejor lectura del nivel.

3.2.1.8. Mantenimiento

Por el diseño del instrumento y carencia de partes móviles, se le da un mantenimiento mínimo y es fácil de limpiar, no existiendo mayores complicaciones en cuanto a mantenimientos preventivos o predictivos.

3.2.2. Ventajas del sistema

Al momento de seleccionar un equipo de medición, se debe definir porqué conviene utilizarlo. Se debe buscar siempre algo que facilite el trabajo para optimizar el tiempo y poder atender otras necesidades laborales que se presenten.

3.2.2.1. Diseño

El transmisor de nivel tipo radar es un diseño integrado, compacto, sin partes móviles, no depende de mecanismos para su funcionamiento y posee una larga vida útil.

3.2.2.3. Tecnología

Este instrumento nos proporciona un monitoreo del producto sin entrar en contacto con el mismo. Esto hace que el instrumento se mantenga limpio por más tiempo y se reduzca el tiempo y gastos en la limpieza del mismo.

3.2.2.4. Versátil

El medidor de nivel tipo radar, por su diseño puede utilizarse para medir distancia, nivel, masa, volumen y reflectividad de líquidos, pulpas y granos con

un tamaño mínimo de 20 milímetros. Aunque en sólidos los resultados no son tan buenos como en los líquidos.

3.2.2.5. Frecuencia de operación baja

Ideal para superficies turbulentas o agitadas, ya que las microondas no se ven afectadas por el ángulo de incidencia. Siempre se logra la reflexión deseada en una superficie no uniforme.

3.2.2.6. Relación señal a ruido

Posee un cociente elevado de señal sobre ruido para un mejor rendimiento en condiciones dinámicas o turbulentas. El movimiento genera una leve discrepancia en la medida, pero al evaluar la relación, el ruido es insignificante en cuanto a intensidad de la señal.

3.2.2.7. Linearización de lectura

Estos dispositivos manejan tablas con una variable dependiente y otra independiente; esto es aplicable en tanques no uniformes donde se tiene una tabla con la linearización de volumen sobre altura (el volumen sería la variable dependiente y la altura la variable independiente).

3.2.2.8. Medición continua

En algunas aplicaciones se tienen interruptores de nivel para monitorear el nivel de cierto tanque, por lo regular se colocan 4 interruptores; bajo bajo, bajo, alto y alto alto. Lo que sucede es que no se llega a conocer con certeza el nivel del tanque debido a que las indicaciones de los interruptores son

puntuales, estos solo indican cuando el producto está en contacto con ellos. Mientras el contenido no está en contacto con ellos, no es posible conocer el nivel del producto. El costo de varios interruptores de nivel es similar o más elevado que el costo de un instrumento tipo radar.

3.2.2.9. Mantenimiento

Por su constitución e instalación el mantenimiento de este instrumento es mínimo. El instrumento como se especifica anteriormente no posee partes móviles (no necesita re calibración) y no tiene contacto con el producto a monitorear. Se recomienda limpiar el instrumento 1 vez cada 6 meses.

3.2.2.10. Ancho de haz

Como toda antena, mientras mayor es la frecuencia del radar, el ancho de haz es más estrecho. Esto viene siendo como una linterna, a mayor frecuencia la luz no se dispersa tanto; útil en tanques altos.

3.2.2.11. Certificado para transferencia de custodia

Debido a su alta precisión (error de 0,5 milímetros) y repetitividad, el instrumento está avalado por organismos internacionales tales como International Organization of Legal Metrology, International Organization of Standards, etc.

3.2.2.12. Instalación y parametrización

La instalación de los transmisores de nivel tipo radar es sencilla y rápida; unidos al contenedor a monitorear por medio de una brida, puede instalarse sin

vaciar el contenedor. Estos cuentan con una pantalla empotrada y botonería para la configuración y monitoreo local del contenedor. Algunos soportan parametrización por medio de infrarrojo para aplicaciones intrínsecamente seguras.

3.2.2.13. Fiabilidad de medida

El radar no es afectado por cambios en las condiciones del proceso; temperatura, presión, densidad, ni por la presencia de vapores, niebla, polvo y espuma. La inmunidad a los vapores, niebla, polvo y espuma se da por la muy estrecha diferencia que hay entre la constante dieléctrica del aire y la constante dieléctrica de estos fenómenos.

3.2.2.14. Soporta alta temperatura

Por ser un instrumento sin contacto con el producto, puede ser utilizado para medir el nivel de metales y minerales fundidos. La temperatura a la que está sometido el medidor es alta, pero considerablemente menor al punto de fusión de los metales y minerales.

3.2.3. Desventajas del sistema

Para poder seleccionar el instrumento adecuado se debe conocer a la perfección el proceso, un elemento de este que no se considere en el diseño del equipo puede causar la medida errónea o que el material no sea el adecuado para el ambiente al que se someterá, entre otras.

3.2.3.1. Medición en espacio libre

El transmisor de nivel debe tener una trayectoria libre hasta llegar a producto deseado a medir, cualquier objeto que se interponga entre la antena y el producto (tubería interna, mezclador, agitador, etc.) provocará una lectura errónea del nivel.

3.2.3.2. Manejo del equipo

Por la tecnología del instrumento el manejo de éste es delicado; si no se tiene el cuidado necesario puede dañarse la antena o al recibir golpes, la circuitería interna del radar puede dañarse permanentemente.

3.2.3.3. Ondas electromagnéticas en productos de alta conductividad

Por las propiedades de la tecnología, la medida es errónea cuando el líquido a monitorear posee una constante dieléctrica muy baja; el líquido posee alta conductividad.

3.2.3.4. Medición de sólidos

Los líquidos poseen la característica de tener una alta reflectividad en cuanto a las ondas electromagnéticas (tomando en cuenta siempre la constante dieléctrica) más los sólidos no, la efectividad en estos va de baja a media.

3.2.3.5. Espuma y polvo en fluidos

Cuando la capa de espuma producida por el mismo proceso es muy gruesa, la lectura del instrumento será de la misma y no el nivel del líquido que se desea medir. De igual manera ocurre con el polvo.

3.3. Factores a considerar en la implementación de un sistema basado en transferencia de custodia

La gama de productos que se almacenan en tanques contenedores es muy amplia; las características de los almacenados por tanto varían ampliamente; yéndose estas a los extremos de propiedades químicas y físicas.

Antes de decidirse por un instrumento para medir nivel de tipo radar tenemos que definir que precisión es la que se necesita. Posteriormente considerar las propiedades físicas y químicas que puedan afectar a las ondas electromagnéticas, promoviendo esto a un mal funcionamiento del aparato y por consiguiente, obteniendo resultados no deseados y poco útiles. Además de las propiedades del producto hay que tomar en cuenta la forma del tanque para la elección final del instrumento.

3.3.1. Factores en la etapa de diseño

Para poder seleccionar el instrumento adecuado, se debe conocer a la perfección el proceso, un elemento de este que no se considere en el diseño del equipo puede causar la medida errónea o que el material no sea el adecuado para el ambiente al que se someterá, entre otras.

3.3.1.1. Tipos de instrumentos

De acuerdo a la precisión requerida en la aplicación y en cuanto a recursos económicos, se debe tomar una decisión de que tecnología radar utilizar; cual se ajusta a mis necesidades. Como anteriormente mencionamos, la tecnología FMCW es la más precisa, exacta y la única avalada para transferencia de custodia. Esto es porque no es afectada por el ruido ya que la información viaja en la frecuencia de la onda, no en la amplitud de la misma.

3.3.1.2. Aplicación

Existen dos tipos básicos de medida de nivel sin contacto en líquidos en tanques, control de inventario y/o transferencia de custodia y control de procesos en tanques y reactores. Los agitadores y otras superficies metálicas, alguna capa gruesa de espuma, condensación y salpicaduras buscas producidas por la alimentación del producto al tanque pueden llegar a causar interferencia.

3.3.1.3. Presión y temperatura de operación

La conexión al proceso puede ser roscada o bien por brida. Se deben conocer las condiciones de presión de operación del tanque para la solicitud del estándar de presión adecuado. De igual forma se debe conocer y especificar la temperatura de operación para garantizar que los materiales de fabricación soporten dicha condición. Estos medidores son capaces de soportar una temperatura de 400 grados centígrados y presiones de hasta 928 libra por pulgada cuadrada.

3.3.1.4. Constante dieléctrica

La constante dieléctrica es la capacidad de un dieléctrico a almacenar energía eléctrica bajo la influencia de un campo eléctrico. El aumento de la constante dieléctrica es directamente proporcional al aumento de la amplitud de la señal. El valor se expresa generalmente con respecto al vacío/aire seco: la constante dieléctrica del aire es 1. La constante dieléctrica del alcohol etílico es de 16,2, esto nos sirve para saber si la onda será reflejada por la superficie del fluido o si se perderá por la alta conductividad del mismo, como ya mencionamos; mientras más alta la constante dieléctrica, mayor es la componente de la onda reflejada.

3.3.1.5. Antena

Existen varios modelos de antena que se ajustan según la estructura del tanque y las condiciones de proceso del producto. Los tipos de antena que pueden adquirirse para la aplicación con radar son:

3.3.1.5.1. Antena cónica

Son las más comunes utilizadas en el mercado de los medidores de nivel tipo radar, esto es por su tamaño (más pequeñas que las parabólicas), pueden instalarse con bridas tan pequeñas como 2 pulgadas y la propagación y recepción de la señal es muy buena. Si bien las antenas cónicas abarcan gran parte del mercado y son recomendables para una amplia gama de aplicaciones, se ha dado el avanzado desarrollo en la configuración de la misma.

En ambientes sucios o con polvo como reactores se pueden colocar instalaciones de purga para limpiar periódicamente la antena sin necesidad de

remover el medidor. Pueden usarse en un pozo de medición que sirve como guía a la onda radiada particularmente para tanques con techo flotante como tanques de gas de petróleo líquido o gas natural líquido.

3.3.1.5.2. Antena parabólica y planar

Estas antenas son utilizadas en aplicaciones de alta precisión, donde precisiones fiscales son requeridas principalmente en tanques de almacenamiento. Estas antenas son de gran tamaño, su conexión a proceso son de bridas de 6 pulgadas en adelante, sin embargo existen diseños especializados de menor tamaño. Por la voluminosidad de estas, su instalación requiere de un acceso principal en el tanque para entrar a este y maniobrar la antena. La antena parabólica proporciona una señal enfocada que se caracteriza por el largo retorno en la señal cuando es instalada según las especificaciones del fabricante. Es muy sensible, por lo que es perfecta para productos que se mueven lentamente dentro del tanque.

3.3.1.5.3. Antena de varilla

Las antenas de varilla tienden a utilizarse en las aplicaciones simples o donde la instalación en el contenedor es bastante restringida. La conexión a proceso de esta antena puede ser roscada al tanque y en varios diseños para satisfacer las necesidades de una aplicación en particular. En general las antenas de varilla ofrecen la peor concentración de haz de onda de todas las antenas, esto limita su uso. Se debe considerar la dispersión de la señal, la frecuencia de onda a utilizar y la condición del contenedor.

3.3.1.5.4. Antena de ventana

Otro estilo de antena es la ventana, que no es más que una antena cónica con una ventana de proceso con un dieléctrico separando el medidor del proceso. Esta antena se ha reconocido como una individual y no una cónica modificada por su amplia demanda de uso. Estas antenas son utilizadas en aplicaciones donde el medidor necesita estar protegido de las condiciones dentro del tanque o donde el recubrimiento de la antena puede ser un problema. Las hay con una superficie a cierto ángulo para ayudar a minimizar la condensación en la ventana.

Las antenas más comunes son la parabólica y la antena de bocina. Cuando el medidor de nivel emite la señal, las microondas se dispersan. Mientras más grande el diámetro de la antena, menor es el ángulo de divergencia y la potencia de la señal es mayor. Las desventajas de antenas pequeñas son el alto esparcimiento del rayo electromagnético y el correspondiente incremento de reflexiones por obstáculos dentro del tanque. Por otro lado, hay una gran probabilidad que el rayo electromagnético emitido va a ser reflejado al detector.

Antenas más grandes generan una señal más concentrada, ayudando a eliminar interferencia de superficies horizontales y planas.

Una antena totalmente montada fuera del tanque proporciona aislamiento y sellado térmico. Si la antena se coloca por debajo de la junta de proceso, se expone a los vapores del proceso, pero las ganancias de las ventajas de las amplitudes de señal más fuerte y la idoneidad para presiones de operación más alto.

3.3.1.6. Rango de medición

Dependiendo del tamaño del tanque podemos proceder a seleccionar la antena. Las antenas de dimensiones de 46 centímetros de diámetro cubren hasta 200 metros, 15 metros las antenas de 15 centímetros de diámetro (ambas medidas para condiciones de espacio libre) y hasta 36 metros las antenas de 35 centímetros de diámetro en un pozo de medición.

3.3.1.7. Incerteza

El error en la medida del instrumento es mínimo. La incerteza puede llegar a ser de 0,04 a 0,125 milímetros para tanques de almacenamiento y 0,25 milímetros en tanques de proceso, esto debido a la turbulencia del producto monitoreado.

3.3.1.8. Tolerancia de capa de cubierta

Cuando por razones del mismo proceso se presentan capas de cierta sustancia sobre el producto que se desea monitorear, los radares pueden discriminar esta si no excede 2,5 centímetros de espesor y es un aceite o pasta no conductiva y puede llegar a discriminar una capa de 0,3 centímetros si es una sustancia conductiva o a base de agua.

3.3.1.9. Turbulencia

Estos instrumentos toleran olas producidas por las turbulencias del proceso de hasta 1 metro, los instrumentos radar por pulsos tienen una pobre tolerancia a las olas de turbulencia.

3.3.1.10. Espuma

Si el producto es no conductivo la capa de espuma puede llegar a ser de 2 metros, hasta 30 centímetros dependiendo de la densidad y conductividad de esta. Sin embargo es una insignificante fuente de error.

3.3.1.11. Presupuesto

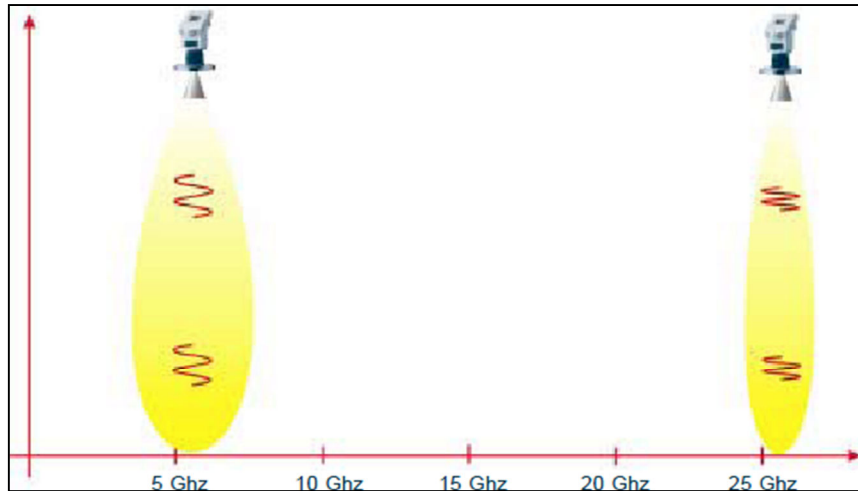
Los medidores de nivel de radar para aplicaciones de tanques de almacenamiento oscilan entre los \$ 3 500 a \$ 5 000, mientras que los de aplicaciones para proceso oscilan entre \$ 1 500 a \$ 2 500.

3.3.1.12. Frecuencia de operación

Amplia gama de frecuencias que van desde los 5,8 a los 26 Gigahertz. La frecuencia de operación es vital para el buen funcionamiento, precisión de la instalación. El cambio en la frecuencia controla la forma de rayo del radar, distancia de medición y resistencia a vapores, condensación y polvo. Mientras mayor es la frecuencia, mayor concentrado es el rayo; puede usarse en aplicaciones donde el espacio tiene obstrucciones a los lados y puede interrumpir un rayo más ancho.

Sin embargo, las altas frecuencias son afectadas por acumulaciones de producto en la antena, condensación y superficies turbulentas a causa de la alimentación del tanque o algún agitador. Los medidores con bajas frecuencias que por la naturaleza de la longitud de onda tienen a soportar vapor, polvo de mejor manera que los de alta frecuencia.

Figura 13. **Comparación de frecuencia utilizada en el transmisor de nivel tipo radar**

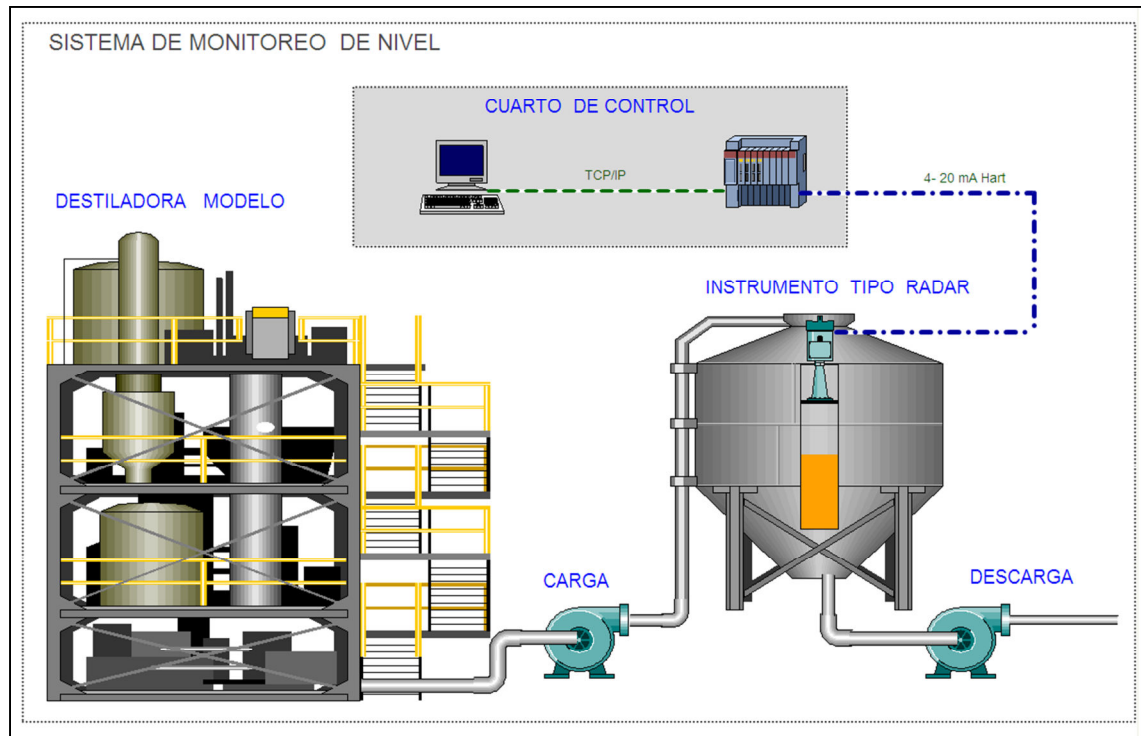


Fuente: www.enraf.ru/userfiles/File/4416650_rev4.pdf. Consulta noviembre 2011.

3.3.1.13. **Número de conductores**

La ventaja primordial del transmisor de 2 hilos es la reducción en el costo del cableado, la alimentación del equipo y la señal de salida pueden ser transmitidas simultáneamente en el par de conductores. Por otra parte, el uso de un dispositivo de 2 hilos con un apropiado protocolo de comunicación como HART, permite un número de medidores y otros instrumentos compatibles conectados en multicanal en un mismo lazo.

Figura 14. Esquema de un sistema de monitoreo de nivel



Fuente: DEVINE, Peter. *Radar measurement, the user's guide*. p. 125.

3.4. Evaluación económica de la implementación del proyecto

Para comprobar la rentabilidad del proyecto se realizó un estudio económico comparando el sistema anterior utilizado para el monitoreo del nivel del alcohol y el sistema implementado instrumentos radares.

El sistema anterior constaba de una varilla de acero inoxidable graduada (en centímetros). Introducían esta en un agujero en la parte superior del tanque y físicamente veían qué medida de la varilla indicaba el nivel del producto y posteriormente recurrían a una tabla de aforo para determinar el contenido del tanque (en litros).

La fuente principal de error de este método consiste en la posición en que se coloca la varilla, si esta no entra completamente vertical en el tanque, si sufre cierta inclinación, la medición varía proporcionalmente a la inclinación de la varilla incrementando el error. Una relación muy similar al teorema de Pitágoras.

A continuación se presenta una de las tablas de aforo de los tanques en los que se implementó el sistema de monitoreo de nivel con instrumentos tipo radar. Cabe recalcar que son 8 los tanques con este instrumento pero las dimensiones de los otros 7 contenedores son las mismas, por lo que no basaremos en una única tabla de aforo para tener una aproximación muy apegada a la realidad de los 7 tanques restantes.

3.4.1. Análisis

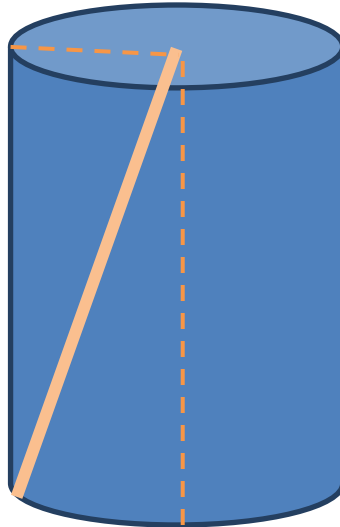
Evaluaremos primero el costo por error en la medición utilizando el método de la varilla. Como todos sabemos ninguna medida es exacta, este concepto es subjetivo, pero podemos aproximarnos a cierto valor con una incerteza muy baja. El error mínimo que puede tener el operador al insertar la varilla es de 1 centímetro y si la varilla entra con un ángulo de inclinación puede tener un error máximo de 38,4 centímetros (ver figura 15 para referencia).

- Error máximo con varilla de medición

Altura de tanque: 7,66 metros

Diámetro de tanque: 4,92 metros

Figura 15. **Gráfico de posición de varilla con error máximo**



Fuente: elaboración propia.

Suponiendo que el tanque está lleno.

Longitud varilla (por medio del teorema de Pitágoras) = 8,045 metros

Error en medición = 8,045 metros – 7,660 metros = 0,385 metros

Volumen aproximado = $\pi * (4,92/2) \text{ metros} * (4,92/2) \text{ metros} * 0,385 \text{ metros} = 7,32 \text{ metros cúbicos}$

Valor aproximado en litros = 7 325,62 litros

Costo de litro de producto = US\$ 20,00

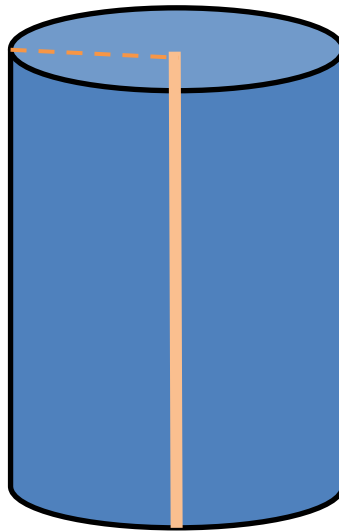
El costo de producto aproximado producido por el máximo error por tanque equivale a US\$ 138 186,81

- Error mínimo con varilla de medición

Altura de tanque: 7,66 metros

Diámetro de tanque: 4,92 metros

Figura 16. **Gráfico de posición de varilla con error mínimo**



Fuente: elaboración propia.

Suponiendo que el tanque está lleno.

El error mínimo que puede tener la medición es la medida más pequeña con la que esta graduada la varilla que se está utilizando. En este caso la varilla esta graduada en centímetros, por tanto el error será de 1 centímetro.

Error en medición = 8,045 – 7,660 metros = 0,01 metros

Volumen aproximado = $\pi * (4,92/2) \text{ metros} * (4,92/2) \text{ metros} * 0,01 \text{ metros} = 0,19012 \text{ metros cúbicos}$

Valor aproximado en litros = 190,12 litros

Costo de litro de producto = US\$ 20,00

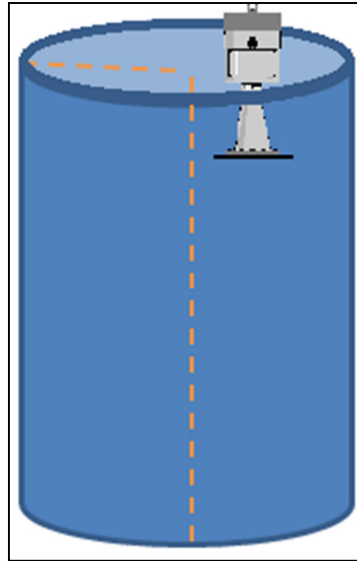
El costo de producto aproximado producido por el mínimo error por tanque equivale a US\$ 3 612,33

- Error máximo con instrumento radar

Altura de tanque: 7,66 metros

Diámetro de tanque: 4,92 metros

Figura 17. Gráfico con instrumento de medición radar



Fuente: elaboración propia.

Suponiendo que el tanque está lleno.

Incerteza máxima: 0,005 metros

Volúmen aproximado = $\pi * (4,92/2) \text{ metros} * (4,92/2) \text{ metros} * 0,005 \text{ metros} = 0,09506 \text{ metros cúbicos}$

Valor aproximado en litros = 95,06 litros

Costo de litro de producto = US\$ 20,00

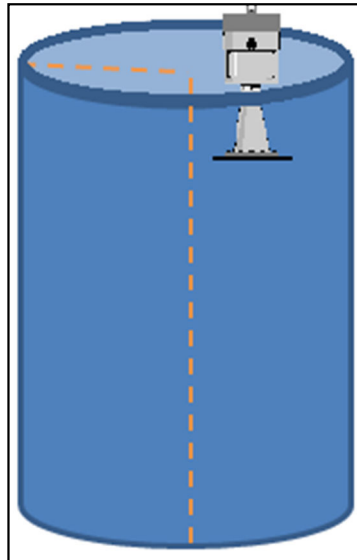
El costo de producto aproximado producido por el máximo error por tanque equivale a US\$ 1 806,11

- Error mínimo con varilla de medición

Altura de tanque: 7,66 metros

Diámetro de tanque: 4,92 metros

Figura 18. **Gráfico con instrumento de medición radar**



Fuente: elaboración propia.

Suponiendo que el tanque está lleno.

Incerteza mínima: 0,001 metros

Volumen aproximado = $\pi * (4,92/2) \text{ metros} * (4,92/2) \text{ metros} * 0,001 \text{ metros} = 0,01901 \text{ metros cúbicos}$

Valor aproximado en litros = 19,01 litros

Costo de litro de producto = US\$ 20,00

El costo de producto aproximado producido por el máximo error por tanque equivale a US\$ 361,22

Los costos con el error máximo y mínimo de cada método de medición son los siguientes:

- Método de varilla

Costo mensual con máximo error =

(Costo de error por tanque) * (Número de tanques despachados al mes)

(US\$ 66 879,49) * (120) = US\$ 8 025 538,24

Costo mensual con mínimo error =

(Costo de error por tanque) * (Número de tanques despachados al mes)

(US\$ 2 387,62) * (120) = US\$ 286 513,92

Instrumento Radar

Costo mensual con máximo de error =

(Costo de error por tanque) * (Número de tanques despachados al mes)

(US\$ 1 193,81) * (120) = US\$ 143 256,96

Costo mensual con mínimo de error =

(Costo de error por tanque) * (Número de tanques despachados al mes)

$$(\text{US\$ } 238,76) * (120) = \text{US\$ } 28\ 651,39$$

La planta produce 300 000 litros de alcohol al día, el equivalente a 4 tanques con las dimensiones anteriormente indicadas.

Suponiendo que se despachan los 4 tanques al día, que la producción es continua durante todo el mes, serían 120 los tanques despachados al mes.

La probabilidad de que la persona encargada de monitorear el nivel de los tanques introduzca la varilla formando un ángulo muy elevado es muy baja, por lo que asumiremos que el error máximo del análisis de costos para el sistema de monitoreo con varilla es 1 centímetro, el valor de incerteza de la escala de la varilla. Tomaremos como valor mínimo el máximo error que el instrumento radar puede presentar, este es de 5 milímetros.

El costo mensual con el máximo porcentaje de error =

$$(\text{US\$ } 1\ 913,81) (120 \text{ tanques}) = \text{US\$ } 286\ 513,92$$

El costo mensual con el mínimo porcentaje de error =

$$(\text{US\$ } 1\ 913,81) (120 \text{ tanques}) = \text{US\$ } 143\ 256,96$$

$$\text{Ahorro} = (\text{costo con máximo porcentaje de error}) - (\text{costo con mínimo porcentaje de error}) = \text{US\$ } 286\ 513,92 - \text{US\$ } 143\ 256,96 = \text{US\$ } 143\ 256,96$$

Podemos observar que el costo mensual con el máximo porcentaje de error es el doble del mínimo porcentaje, esto es porque la incerteza del instrumento es la mitad de la incerteza de la varilla.

Después de conocer los costos por los errores en los sistemas de medición de nivel de los tanques, procedemos a realizar una tabla de los ingresos y egresos de la fábrica implementando el proyecto de medición de nivel por medio de instrumentos tipo radar.

Tabla IV. Evaluación económica del proyecto

COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN	Año 0						
	Mes 0	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	
Costos de equipos y materiales	(45 000,00)						
Costos de licencias	(10 200,00)						
Costos de ingeniería	(7 000,00)						
Costos de implementación			(7 000,00)				
Costos de mantenimiento y verificación de calibración							
Egresos Totales	(62 200,00)	-	(7 000,00)	-	-	-	
INGRESOS POR IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA							
Ingresos x ahorro usando error máximo (% Mínimo Varilla - % Máximo Instrumento)				216 733,45	216 733,45	216 733,45	
Ingresos Totales	-	-	-	216 733,45	216 733,45	216 733,45	
Total Ingresos - Egresos	(62 200,00)	-	(7 000,00)	216 733,45	216 733,45	216 733,45	
Ingresos - Egresos Acumulados	(62 200,00)	(62 200,00)	(69 200,00)	147 533,45	364 266,91	581 000,36	
Tasa de Interés (Máxima Bancaria) VAN	5% 6 727 505,00						
TIR (Tasa Interna de Retorno)	91%						
	Año 0						Totales
Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12	
							(45 000,00)
							(10 200,00)
							(7 000,00)
							(7 000,00)
(1 000,00)			(1 000,00)			(1 000,00)	(3 000,00)
(1 000,00)	-	-	(1 000,00)	-	-	(1 000,00)	(72 200,00)
216 733,45	216 733,45	216 733,45	216 733,45	216 733,45	216 733,45	216 733,45	2 167 334,55
216 733,45	216 733,45	216 733,45	216 733,45	216 733,45	216 733,45	216 733,45	2 167 334,55
215 733,45	216 733,45	216 733,45	215 733,45	216 733,45	216 733,45	215 733,45	2 095 134,55
796 733,82	1 013 467,27	1 230 200,73	1 445 934,18	1 662 667,64	1 879 401,09	2 095 134,55	
*Cifras en dólares de los Estados Unidos de América							

Fuente: elaboración propia.

3.4.2. Costos de implementación

Costos de equipos y materiales: este apartado se refiere al costo de los instrumentos tipo radar y los accesorios necesarios para la conexión eléctrica; cables, prensaestopas, terminales para cables, etc.

Costos de licencias: todo equipo de automatización necesita un permiso para poder integrarse (instrumento-controlador-visualizador) para la buena apreciación del proceso que se está llevando a cabo.

Costo de ingeniería: todo proyecto de ingeniería, se compone de varias etapas (conceptual, básica, detalle). Cada una de estas cuidadosamente elaborada para no dejar cabos sueltos en el momento de la ejecución del proyecto.

Costo de implementación: la aplicación de la ingeniería conceptual, básica y de detalle se lleva a cabo en este apartado. Se ultiman detalles para el comisionamiento y la puesta en marcha del proyecto.

Mantenimiento y calibración: cada cierto tiempo un ente certificado debe presentarse a la fábrica, revisar los equipos, debe darles mantenimiento y corroborar que efectivamente el instrumento siga con las características de medición con las que las entrego el fabricante o tratar de mantenerlas.

3.4.3. VAN

Se ejemplificara la definición del VAN; tenemos un proyecto que requiere cierta inversión y nos generará flujos de caja positivos, a lo largo de los años de evaluación del proyecto, habrá un punto en el que recuperemos la inversión. Pero claro, si en lugar de invertir el dinero en un proyecto empresarial lo

hubiéramos invertido en un producto financiero, también tendríamos un retorno de dicha inversión. Por lo tanto a los flujos de caja hay que recortarles una tasa de interés que podríamos haber obtenido, es decir, actualizar los ingresos futuros a la fecha actual. Si a este valor le descontamos la inversión inicial, tenemos el Valor Actual Neto del proyecto.

Vemos que el proyecto es altamente rentable. La inversión inicial es de US\$ 71 000,00 y el ingreso neto es de US\$ 2 167 334,55. Por tanto tenemos una ganancia de US\$ 2 095 134,55, lo cual indica claramente que la inversión se recupera en menos de un año.

3.4.4. TIR

La Tasa Interna de Retorno sería el tipo de interés en el que el VAN se hace cero. Si el TIR es alto, estamos ante un proyecto empresarial rentable, que supone un retorno de la inversión equiparable a unos tipos de interés altos que posiblemente no se encuentren en el mercado. Sin embargo, si el TIR es bajo, posiblemente podríamos encontrar otro destino para nuestro dinero.

Al ver el cálculo del TIR en este proyecto, nadie apostaría por invertir el dinero en un producto financiero. El valor del TIR es muy alto, por lo que refleja también la rentabilidad de la ejecución del proyecto.

CONCLUSIONES

1. La tecnología FMCW no se ve afectada por vapores, espuma o gases que se interpongan entre el producto y la antena.
2. En la tecnología FMCW la información viaja en la frecuencia de la onda, lo que la hace menos susceptible al ruido, fiable y certera para la medición de nivel de un tanque de etanol.
3. Los equipos para medición de nivel tipo radar cuentan con un error de 1 milímetro, al utilizar cualquier otra tecnología obtendríamos errores más grandes y por tanto, el ahorro fuera menor.
4. El Valor Actual Neto indica una ganancia de US\$ 2 095 134,55 al año comparado con el método de medición anteriormente utilizado, y la Tasa Interna de Retorno es de 91 por ciento, lo que refleja una alta rentabilidad del proyecto.

RECOMENDACIONES

1. Se deben conocer las características dieléctricas y físicas del producto a medir, en especial la cantidad de espuma del mismo para determinar si los instrumentos de nivel de tipo radar son adecuados para la aplicación deseada.
2. Se debe conocer la exactitud deseada en la medición de nivel de productos para determinar el modelo de antena a utilizar en el sistema que cumpla con los requerimientos deseados.
3. Se debe realizar una calibración semestral ya que de la fiabilidad de la medida depende el ahorro anteriormente mencionado. En Guatemala el encargado es el Ministerio de Economía que cuenta con el único laboratorio de metrología certificado.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALTHOF, Mike. *Selection of measuring principle for custody transfer tanks* [en línea]. ENRAF, Estados Unidos de America: 2011. www.enraftankssystem.com. [Consulta: noviembre de 2011].
2. _____. *The art of tank gauging* [en línea]. ENRAF. Estados Unidos de América, 2008. www.enraftankssystem.com. [Consulta: noviembre de 2011].
3. BORJA SALAZAR, Daniel Patricio. *Diseño de un sistema de medición y control de uso de combustibles para las centrales de generación termoeléctrica del SNI*. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero en electrónica y control. Escuela de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, Perú: 2009. 197 p.
4. Centro Nacional de Metrología. *Patrones nacionales de medición* [en línea]. México, 2009. www.cenam.com.mx. [Consulta: enero de 2012].
5. CREUS SOLE, Antonio. *Instrumentación Industrial*. 7a ed. México: Marcombo, 2005. 775 p. ISBN 9788426713612.
6. DEVINE, Peter. *Radar level measurement, the user's guide*. USA: Vega Controls, 2000. 154 p. ISBN 0-9538920-0-X.

7. LUCHSINGER, H., et al. *Requerimientos de medición de flujo en la industria petrolera mexicana* [en línea]. México, 2011. www.cenam.com.mx. [Consulta: octubre de 2011].

8. SABOGAL, L. *Especificaciones generales de los instrumentos de medición* [en línea]. Publicaciones de estudiantes publicación ID: UB2383SEE5867, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, 2011, www.cmap.upb.edu.co. [Consulta: enero de 2011].

APÉNDICE

TABLA DE AFORO TANQUE DE ETANOL

Cm	Litros	Cm	Litros	Cm	Litros	Cm	Litros	Cm	Litros
0	2 251	35	9 185	70	15 918	105	22 552	140	29 157
1	2 453	36	9 380	71	16 108	106	22 741	141	29 345
2	2 655	37	9 574	72	16 299	107	22 930	142	29 534
3	2 856	38	9 768	73	16 489	108	23 119	143	29 723
4	3 058	39	9 963	74	16 679	109	23 308	144	29 911
5	3 259	40	10 156	75	16 870	110	23 497	145	30 100
6	3 460	41	10 350	76	17 060	111	23 685	146	30 289
7	3 660	42	10 544	77	17 250	112	23 874	147	30 478
8	3 861	43	10 737	78	17 440	113	24 063	148	30 666
9	4 061	44	10 931	79	17 630	114	24 252	149	30 855
10	4 260	45	11 124	80	17 820	115	24 440	150	31 044
11	4 460	46	11 317	81	18 010	116	24 629	151	31 233
12	4 659	47	11 510	82	18 199	117	24 818	152	31 422
13	4 858	48	11 703	83	18 389	118	25 006	153	31 611
14	5 057	49	11 896	84	18 579	119	25 195	154	31 799
15	5 256	50	12 088	85	18 768	120	25 384	155	31 988
16	5 454	51	12 281	86	18 958	121	25 572	156	32 177
17	5 652	52	12 473	87	19 148	122	25 761	157	32 366
18	5 850	53	12 665	88	19 337	123	25 950	158	32 555
19	6 048	54	12 857	89	19 526	124	26 138	159	32 744
20	6 246	55	13 049	90	19 716	125	26 327	160	32 933
21	6 443	56	13 241	91	19 905	126	26 516	161	33 122
22	6 640	57	13 433	92	20 095	127	26 704	162	33 311
23	6 837	58	13 625	93	20 284	128	26 893	163	33 500
24	7 034	59	13 816	94	20 473	129	27 081	164	33 689
25	7 230	60	14 008	95	20 662	130	27 270	165	33 878
26	7 426	61	14 199	96	20 851	131	27 459	166	34 067

Continuación

Cm	Litros	Cm	Litros	Cm	Litros	Cm	Litros	Cm	Litros
27	7 623	62	14 391	97	21 041	132	27 647	167	34 256
28	7 819	63	14 582	98	21 230	133	27 836	168	34 445
29	8 014	64	14 773	99	21 419	134	28 025	169	34 634
30	8 210	65	14 964	100	21 608	135	28 213	170	34 823
31	8 405	66	15 155	101	21 797	136	28 402	171	35 013
32	8 601	67	15 346	102	21 986	137	28 591	172	35 202
33	8 796	68	15 536	103	22 175	138	28 779	173	35 391
34	8 990	69	15 727	104	22 364	139	28 968	174	35 580
175	35 770	210	42 409	245	49 080	280	55 776	315	62 488
176	35 959	211	42 599	246	49 271	281	55 967	316	62 680
177	36 148	212	42 790	247	49 462	282	56 159	317	62 871
178	36 337	213	42 980	248	49 653	283	56 350	318	63 063
179	36 527	214	43 170	249	49 844	284	56 542	319	63 255
180	36 716	215	43 360	250	50 035	285	56 734	320	63 447
181	36 906	216	43 551	251	50 226	286	56 925	321	63 639
182	37 095	217	43 741	252	50 417	287	57 117	322	63 831
183	37 285	218	43 931	253	50 608	288	57 309	323	64 023
184	37 474	219	44 122	254	50 799	289	57 500	324	64 215
185	37 664	220	44 312	255	50 990	290	57 692	325	64 407
186	37 853	221	44 502	256	51 182	291	57 884	326	64 599
187	38 043	222	44 693	257	51 373	292	58 076	327	64 791
188	38 232	223	44 883	258	51 564	293	58 267	328	64 983
189	38 422	224	45 074	259	51 755	294	58 459	329	65 175
190	38 611	225	45 264	260	51 947	295	58 651	330	65 367
191	38 801	226	45 455	261	52 138	296	58 843	331	65 559
192	38 991	227	45 646	262	52 329	297	59 034	332	65 751
193	39 180	228	45 836	263	52 521	298	59 226	333	65 943
194	39 370	229	46 027	264	52 712	299	59 418	334	66 135
195	39 560	230	46 217	265	52 903	300	59 610	335	66 327
196	39 750	231	46 408	266	53 095	301	59 801	336	66 518
197	39 939	232	46 599	267	53 286	302	59 993	337	66 710
198	40 129	233	46 789	268	53 477	303	60 185	338	66 902

Continuación

Cm	Litros	Cm	Litros	Cm	Litros	Cm	Litros	Cm	Litros
199	40 319	234	46 980	269	53 669	304	60 377	339	67 094
200	40 509	235	47 171	270	53 860	305	60 569	340	67 286
201	40 699	236	47 362	271	54 052	306	60 761	341	67 478
202	40 889	237	47 552	272	54 243	307	60 953	342	67 670
203	41 079	238	47 743	273	54 435	308	61 144	343	67 862
204	41 269	239	47 934	274	54 626	309	61 336	344	68 054
205	41 459	240	48 125	275	54 818	310	61 528	345	68 246
206	41 649	241	48 316	276	55 009	311	61 720	346	68 438
207	41 839	242	48 507	277	55 201	312	61 912	347	68 630
208	42 029	243	48 698	278	55 392	313	62 104	348	68 822
209	42 219	244	48 889	279	55 584	314	62 296	349	69 014
350	69 206	385	75 923	420	82 634	455	89 339	490	96 044
351	69 398	386	76 115	421	82 825	456	89 531	491	96 236
352	69 590	387	76 306	422	83 017	457	89 722	492	96 428
353	69 782	388	76 498	423	83 209	458	89 914	493	96 619
354	69 974	389	76 690	424	83 400	459	90 105	494	96 811
355	70 166	390	76 882	425	83 592	460	90 297	495	97 003
356	70 358	391	77 074	426	83 783	461	90 489	496	97 194
357	70 550	392	77 265	427	83 975	462	90 680	497	97 386
358	70 742	393	77 457	428	84 167	463	90 872	498	97 578
359	70 934	394	77 649	429	84 358	464	91 063	499	97 769
360	71 125	395	77 841	430	84 550	465	91 255	500	97 961
361	71 317	396	78 033	431	84 742	466	91 446	501	98 153
362	71 509	397	78 224	432	84 933	467	91 638	502	98 344
363	71 701	398	78 416	433	85 125	468	91 829	503	98 536
364	71 893	399	78 608	434	85 316	469	92 021	504	98 728
365	72 085	400	78 800	435	85 508	470	92 212	505	98 920
366	72 277	401	78 991	436	85 700	471	92 404	506	99 111
367	72 469	402	79 183	437	85 891	472	92 596	507	99 303
368	72 661	403	79 375	438	86 083	473	92 787	508	99 495
369	72 853	404	79 567	439	86 274	474	92 979	509	99 687
370	73 045	405	79 758	440	86 466	475	93 170	510	99 879

Continuación

Cm	Litros	Cm	Litros	Cm	Litros	Cm	Litros	Cm	Litros
371	73 237	406	79 950	441	86 657	476	93 362	511	100 070
372	73 428	407	80 142	442	86 849	477	93 553	512	100 262
373	73 620	408	80 333	443	87 041	478	93 745	513	100 454
374	73 812	409	80 525	444	87 232	479	93 937	514	100 646
375	74 004	410	80 717	445	87 424	480	94 128	515	100 838
376	74 196	411	80 909	446	87 615	481	94 320	516	101 030
377	74 388	412	81 100	447	87 807	482	94 511	517	101 221
378	74 580	413	81 292	448	87 998	483	94 703	518	101 413
379	74 772	414	81 484	449	88 190	484	94 895	519	101 605
380	74 963	415	81 675	450	88 381	485	95 086	520	101 797
381	75 155	416	81 867	451	88 573	486	95 278	521	101 989
382	75 347	417	82 059	452	88 765	487	95 469	522	102 181
383	75 539	418	82 250	453	88 956	488	95 661	523	102 373
384	75 731	419	82 442	454	89 148	489	95 853	524	102 565
525	102 757	560	109 486	595	116 240	630	123 019	665	129 815
526	102 949	561	109 679	596	116 433	631	123 213	666	130 010
527	103 141	562	109 872	597	116 627	632	123 407	667	130 204
528	103 333	563	110 064	598	116 820	633	123 601	668	130 398
529	103 525	564	110 257	599	117 013	634	123 796	669	130 592
530	103 717	565	110 450	600	117 207	635	123 990	670	130 786
531	103 909	566	110 642	601	117 400	636	124 184	671	130 980
532	104 101	567	110 835	602	117 594	637	124 378	672	131 175
533	104 293	568	111 028	603	117 787	638	124 572	673	131 369
534	104 485	569	111 220	604	117 981	639	124 766	674	131 563
535	104 677	570	111 413	605	118 174	640	124 960	675	131 757
536	104 870	571	111 606	606	118 368	641	125 154	676	131 951
537	105 062	572	111 799	607	118 562	642	125 348	677	132 145
538	105 254	573	111 992	608	118 755	643	125 543	678	132 339
539	105 446	574	112 185	609	118 949	644	125 737	679	132 533
540	105 638	575	112 377	610	119 142	645	125 931	680	132 727
541	105 831	576	112 570	611	119 336	646	126 125	681	132 921
542	106 023	577	112 763	612	119 530	647	126 319	682	133 115

Continuación

Cm	Litros	Cm	Litros	Cm	Litros	Cm	Litros	Cm	Litros
543	106 215	578	112 956	613	119 724	648	126 514	683	133 309
544	106 407	579	113 149	614	119 917	649	126 708	684	133 503
545	106 600	580	113 342	615	120 111	650	126 902	685	133 697
546	106 792	581	113 535	616	120 305	651	127 096	686	133 891
547	106 984	582	113 728	617	120 499	652	127 290	687	134 085
548	107 177	583	113 921	618	120 692	653	127 485	688	134 279
549	107 369	584	114 114	619	120 886	654	127 679	689	134 473
550	107 561	585	114 308	620	121 080	655	127 873	690	134 666
551	107 754	586	114 501	621	121 274	656	128 067	691	134 860
552	107 946	587	114 694	622	121 468	657	128 262	692	135 054
553	108 139	588	114 887	623	121 662	658	128 456	693	135 247
554	108 331	589	115 080	624	121 856	659	128 650	694	135 441
555	108 524	590	115 273	625	122 049	660	128 844	695	135 635
556	108 716	591	115 467	626	122 243	661	129 038	696	135 828
557	108 909	592	115 660	627	122 437	662	129 233	697	136 022
558	109 101	593	115 853	628	122 631	663	129 427	698	136 215
559	109 294	594	116 047	629	122 825	664	129 621	699	136 409
700	136 602	714	139 304	728	141 993	743	144 852	757	147 495
701	136 795	715	139 497	729	142 184	744	145 042	758	147 683
702	136 989	716	139 689	730	142 375	745	145 232	759	147 870
703	137 182	717	139 882	732	142 758	746	145 421	760	148 057
704	137 375	718	140 074	733	142 949	747	145 610	761	148 244
705	137 568	719	140 266	734	143 140	748	145 799	762	148 431
706	137 762	720	140 458	735	143 330	749	145 988	763	148 618
707	137 955	721	140 650	736	143 521	750	146 177	764	148 804
708	138 148	722	140 842	737	143 712	751	146 366	765	148 991
709	138 340	723	141 034	738	143 902	752	146 555	766	149 177
710	138 533	724	141 226	739	144 092	753	146 743		
711	138 726	725	141 418	740	144 282	754	146 931		
712	138 919	726	141 610	741	144 473	755	147 119		
713	139 112	727	141 801	742	144 663	756	147 307		

Fuente: elaboración propia.