



308917  
2  
**UNIVERSIDAD PANAMERICANA**

**ESCUELA DE INGENIERIA**

Reprodución autorizada por el Departamento de Publicaciones de la Universidad Panamericana. Impreso en México.

Dr. Leopoldo Villacorta  
del Campo  
12103703  
102021

**CON ESTUDIOS INCORPORADOS A LA  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**"DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE  
PRIMARIOS DE MEDICIÓN (SENSORES) PARA LA DETECCIÓN Y MEDICIÓN  
DE NIVEL Y FLUJO EN PROCESOS INDUSTRIALES"**

**T E S I S   P R O F E S I O N A L  
Q U E   P A R A   O B T E N E R   E L   T Í T U L O   D E  
I N G E N I E R O   M E C Á N I C O   E L E C T R I C I S T A**

**ÁREA: INGENIERÍA MECÁNICA**

**P R E S E N T A N :**

**BERNARD GABRIEL ALBRAND DEMICHELI**

**JORGE ARREOLA ESPINOSA**

**RUBÉN CRUZ LÓPEZ**

**ESTEBAN DALMA TENA**

**ARLENE PERTZEL CARRANZA**

**DIRECTOR DE TESIS: M.I. LEOPOLDO A. GONZÁLEZ GONZÁLEZ**

TESIS CON  
FALSA DE ORIGEN

**MÉXICO, D.F.**

**2003**

**A**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## DEDICATORIAS

**Quando la sabiduria entrare en tu corazón,  
Y la ciencia fuere grata a tu alma,  
La discreción te guardará;  
Te preservará la Inteligencia,  
Para librarte del mal camino.**

*Pr. 2:10-12*

- **A DIOS:**

Por ser mi Padre y maestro, por el don de la vida.

- **A mi HIJO:**

Ehinar, mi pequeño sol, mi razón de vivir, para que veas en tu madre un ejemplo a seguir. Por ser el pequeño más tierno del mundo.

- **A mis PADRES:**

Jorge y Luz María, por su amor, ejemplo y apoyo sin límites. Por su comprensión y firmeza, por su ternura y horas de desvelo, gracias, hoy y siempre.

- **A mis HERMANOS:**

Christian y Alain, por una niñez y adolescencia de fantasía, porque seremos amigos, y compañeros toda la vida.

- **A CÉSAR OCTAVIO GRANADOS LARA:**

Por ser el amor de mi vida, no importando las circunstancias.

- **A mi HERMANA:**

Mema, por compartir su niñez tu conmigo por tu amor, ayuda y apoyo.

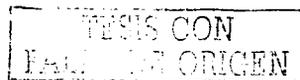
- **A mi HERMANA:**

Marce, por tu amor, cariño, amistad desde siempre y por siempre. Por estar ahí cuando lo necesito.

- **A dos AMIGOS DE ENSUEÑO:**

Alberto, mi hermano, mi apoyo, mi compañero y protector. Gracias por las horas y días dedicados.

Mauricio, por ser mi niño entonado, por tu amistad pasada, por tus palabras de aliento por tus cuidados.



- **A mis COMPAÑEROS DE TESIS:**

Jorge, Esteban, Bernard y Rubén, por ser un equipo, por su trabajo y disposición para la culminación de un logro más en nuestras vidas.

- **Para mis AMIGOS DE AYER, HOY Y SIEMPRE:**

- **A QUIENES ME HAN DEJADO UNA HUELLA IMPORTANTE:**

Felipe Hernández, Francisco Velasco, Juan Carlos Miguel Mejía, Olivia Quesada, Consuelo Gómez, Isela Vargas, Patricia Munguía, Francisco Hernández, Francisco Jesús López, Maritza Oliva, Rosalba Saviñón, Cecilia Trejo, Eduardo Zamarripa, Fernando Reyes, Julián Fernández, Fernando Rayón, Roberto Aguilera, Guadalupe Alvarado, Josefina Fuentes, Ana Caballero, y a tantos más que han estado a mi lado siempre...

**Arlene**

c

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## DEDICATORIAS

- **A ANDRÉ ALBRAND COGORDAN†  
Y ENRIQUETA E. DEMICHELIS BERCHIATTI:**

A esos dos increíbles papás quienes me han traído al mundo y que han sido un perfecto ejemplo en toda mi vida. Es difícil expresar en tan poco espacio todo el agradecimiento que tengo ante ustedes por todo el apoyo que me dieron durante todos mis estudios, pero creo que pudiera describirlo con una sola palabra ..... Los amo.

- **A ustedes MEMÉ y PEPÉ†:**

Por haber confiado tanto en mí y haberme dado la fuerza para concluir con esta etapa de mi vida.

- **A mis hermanos; ISABELLE, CLAUDINE y MICHEL:**

Por todo lo que hemos vivido juntos y lo mucho que me han enseñado a lo largo de mi vida. Los quiero mucho y les debo gran parte de lo que soy.

- **A mis compañeros de tesis; ARLENE, JORGE, RUBÉN y ESTEBAN:**

Por haber formado un excelente equipo y haber concluido sin ningún contratiempo este trabajo.

- **A ti NINFA:**

Por ese amor que siento por ti y esa magia que me haces sentir. No sabes lo feliz que soy a tu lado y lo muy orgulloso que estoy por todo el apoyo que me das en cualquier momento y circunstancia. Recuerda:

*"Tu es l'amour de ma vie"*

**Bernard**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## DEDICATORIAS

- A mis padres **RAÚL Y ROSALBA:**

Por su amor y apoyo incondicional a lo largo de mi vida. Gracias mamá, gracias papá.

- A mis **CONCHITAS:**

Por ser fuente de inspiración para superarme cada día. Las amo.

- A mi amada **ESPOSA:**

Por su ayuda, apoyo y comprensión para la realización de éste y tantos otros proyectos (presentes, pasados y futuros). Recuerda siempre que ...En ti están basadas todas mis esperanzas. Te amo.

- A mis **HERMANOS:**

Quienes me han acompañado y apoyado a lo largo de la vida.

- A todas aquellas **PERSONAS:**

Que han contribuido a mi formación y que a lo largo de mi vida me han dado lecciones invaluable. A mis maestros, a mis guías, a mis amigos, a mis compañeros de estudio.

- A mis **COMPAÑEROS DE TESIS:**

Quienes, con su dedicación y talento hicieron posible la realización de este trabajo; Esteban, Jorge, Bernard, Arlene, gracias.

- A **DIOS:**

Gracias por tantas y tantas bendiciones.

**Rubén**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## DEDICATORIAS

- **A DIOS:**

Por regalarme la vida.

- **A mis padres, ERIC† y SUSANA:**

No solo por darme la bendición de estar vivo, sino por su apoyo constante e incondicional, ejemplo, amor y amistad.

- **A ERIK, JENNY, ANDRÉS, MIGUEL, ÁLVARO, GABRIEL, RAFAEL y PILAR:**

Por ser fuente de tantas alegrías a lo largo de mi vida y por brindarme su apoyo y cariño.

- **A ANA LAURA:**

Por ser el más maravilloso presente y la máxima ilusión en el futuro. Gracias por tu ayuda, amor y amistad.

- **A mis AMIGOS:**

Con los cuales he disfrutado tanto de la magia de estar vivos.

- **A ARLENE, JORGE, RUBÉN Y BERNARD:**

Por compartir este proyecto que tanta satisfacción nos traerá.

- **A mis PROFESORES:**

Por hacerme un mejor profesionista, y en muchos casos mejor persona.

- **A todos AQUÉLLOS:**

Con los que me he cruzado en el camino y que han dejado alguna enseñanza, se los agradezco.

**Esteban**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## **DEDICATORIAS**

- **A mis PADRES:**

Que siempre han creído en mí y han sido un ejemplo a seguir.

- **A mi ESPOSA:**

Por su permanente apoyo, comprensión y cariño.

- **A mi HIJO:**

Con todo mi amor.

- **A MATY, EDUARDO Y JAVIER:**

Por estar siempre presentes.

**Jorge**

TESIS CON  
FALDA DE ORIGEN

# ÍNDICE

	PÁGINA
INTRODUCCIÓN .....	1
ANTECEDENTES.....	3
OBJETIVOS .....	5
CAPÍTULO 1 PRINCIPIOS FÍSICOS UTILIZADOS EN LA MEDICIÓN Y DETECCIÓN DE NIVEL Y FLUJO.....	6
1.1 PRINCIPIOS FÍSICOS DE MEDICIÓN Y DETECCIÓN DE NIVEL .....	6
1.1.1 PRINCIPIO FÍSICO DE CONDUCTIVIDAD.....	6
1.1.2 PRINCIPIO FÍSICO DE CAPACITANCIA .....	8
1.1.3 PRINCIPIOS FÍSICOS DE RADIACIÓN, ULTRASONIDO Y MICROONDAS .....	10
1.1.4 PRINCIPIO FÍSICO DE PRESIÓN HIDROSTÁTICA.....	12
1.1.5 PRINCIPIOS FÍSICOS ELECTROMECAÑICOS.....	14
1.2 PRINCIPIOS FÍSICOS DE MEDICIÓN Y DETECCIÓN DE FLUJO.....	15
1.2.1 PRINCIPIO FÍSICO DE ELECTROMAGNETISMO.....	15
1.2.2 PRINCIPIO FÍSICO DE VÓRTICES.....	16
1.2.3 PRINCIPIO FÍSICO DE ULTRASONIDO.....	17
1.2.4 PRINCIPIO FÍSICO DE BERNOULLI.....	18
1.2.5 PRINCIPIO FÍSICO GIROSTÁTICO (ACELERACIÓN DE CORIOLIS).....	20
1.2.6 PRINCIPIO FÍSICO DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO .....	21
1.2.7 PRINCIPIO FÍSICO DE LÁSER.....	21
1.2.8 PRINCIPIO FÍSICO DE EFECTO DOPPLER .....	22
CAPÍTULO 2 MÉTODOS DE DETECCIÓN Y MEDICIÓN DE NIVEL .....	24
2.1 MÉTODO POR CONDUCTIVIDAD.....	24
2.1.1 MÉTODO DE DETECCIÓN DE NIVEL POR LÍMITE MÁXIMO O MÍNIMO.....	24
2.1.2 MÉTODO POR CONTROL DE DOS PUNTOS.....	25
2.2 MÉTODO POR CAPACITANCIA.....	26
2.2.1 EL CONCEPTO S.D.M. (SUPERFICIE – DISTANCIA - MONTAJE).....	27
2.3 MÉTODO POR RADIACIÓN GAMMA.....	29

2.4	MÉTODO POR ULTRASONIDO .....	31
2.5	MÉTODO POR MICROONDAS .....	35
2.6	MÉTODO POR PRESIÓN .....	39
2.7	MÉTODO ELECTROMECAÁNICO .....	43
2.7.1	DETECCIÓN DE NIVEL EN LÍQUIDOS EMPLEANDO RESONANCIA DE DIAPASONES VIBRATORIOS .....	43
2.7.2	DETECCIÓN DE NIVEL EN SÓLIDOS A GRANEL UTILIZANDO EL DIAPASÓN .....	44
2.7.3	SWITCHES DE NIVEL ROTATORIOS PARA MATERIALES A GRANEL .....	45
2.7.4	SISTEMAS ELECTROMECAÁNICOS DE PLOMADA .....	46
2.7.5	SISTEMAS ELECTROMECAÁNICOS PARA MEDICIÓN DE NIVEL EN LÍQUIDOS (FLOTADOR) .....	47
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>MÉTODOS DE DETECCIÓN Y MEDICIÓN DE FLUJO.....</b>	<b>50</b>
3.1	MÉTODO DE MEDICIÓN DE CAUDAL O FLUJO .....	52
3.1.1	MEDICIÓN POR ELECTROMAGNETISMO.....	53
3.1.2	MEDICIÓN POR VÓRTICES .....	56
3.1.3	MEDICIÓN POR DESPLAZAMIENTO .....	62
3.1.4	MEDICIÓN POR ULTRASONIDO .....	64
3.1.5	MEDICIÓN POR CANAL .....	66
3.1.6	MEDICIÓN POR PLACA DE ORIFICIO .....	68
3.1.7	MEDICIÓN POR TURBINAS .....	69
3.1.8	MEDICIÓN DE FLUJO POR PRINCIPIO LÁSER-DOPPLER .....	70
3.1.9	MEDICIÓN DE FLUJO DE OBJETIVO PARA LÍQUIDOS, GASES Y VAPORES.....	72
3.2	MÉTODO DE MEDICIÓN DE FLUJO MÁSIICO.....	73
3.2.1	MEDICIÓN DE FLUJO POR ACELERACIÓN DE CORIOLIS.....	73
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.....</b>	<b>76</b>
4.1	ANTECEDENTES .....	76
4.2	METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE MEDIDORES DE NIVEL Y DE FLUJO .....	76
4.2.1	DEFINIR EL ESTADO FÍSICO DEL PRODUCTO QUE SE DESEA MEDIR.....	77
4.2.2	DEFINIR FUNCIÓN A REALIZAR POR EL INSTRUMENTO .....	77
4.2.3	PROPIEDADES FÍSICAS DEL PRODUCTO.....	77

4.2.4	CONDICIONES DEL PROCESO .....	78
4.2.5	RESTRICCIONES DEL PROCESO.....	78
4.2.6	APLICACIÓN DE LAS TABLAS DE SELECCIÓN DE .....	79
4.2.7	EVALUACIÓN DE COSTO Y PRECISIÓN DEL INSTRUMENTO.....	82
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL PROCESO (CASO PRÁCTICO) .....</b>	<b>87</b>
5.1	DESCRIPCIÓN DE UN PROCESO EN LA INDUSTRIA DE BEBIDAS .....	87
5.2	PROCESO DE ELABORACIÓN DE BEBIDAS .....	89
5.3	SERVICIOS AUXILIARES DE PLANTA Y LAVADO DE ENVASE .....	90
5.4	PROCESO GENERAL DE PREPARACIÓN DE BEBIDAS CARBONATADAS.....	91
5.4.1	DISOLUCIÓN DE EDULCORANTES.....	92
5.4.1.1	UTILIZANDO AZÚCAR DE CAÑA Y DISOLVIENDO POR .....	92
5.4.1.2	UTILIZANDO AZÚCAR DE CAÑA Y DISOLVIENDO EN CONTINUO .....	93
5.4.1.3	UTILIZACIÓN DIRECTA DE FRUCTOSA .....	94
5.4.1.4	UTILIZACIÓN DE UNA MEZCLA DE JARABE DE CAÑA DE AZÚCAR Y FRUCTOSA .....	95
5.4.2	DISOLUCIÓN Y MANEJO DE CONCENTRADO Y FORMULACIÓN DE JARABE TERMINADO .....	96
5.4.2.1	PREPARACIÓN POR LOTES DE JARABE TERMINADO Y POSTERIORMENTE DISOLUCIÓN EN CONTINUO CON AGUA .....	96
5.4.2.2	FORMULACIÓN DE JARABE DE BEBIDA TERMINADA SIN GAS EN CONTINUO.....	97
5.4.3	CARBONATACIÓN DE LA BEBIDA .....	98
5.4.3.1	POR CONTROL DE PRESIÓN Y TEMPERATURA EN UN TANQUE CERRADO .....	98
5.4.3.2	EN CONTINUO CON MEDIDORES MÁSCOS .....	98
5.4.4	SANEAMIENTO DE TANQUES.....	99
5.4.5	INSPECCIÓN DE NIVEL DE LLENADO .....	100
<b>CAPÍTULO 6</b>	<b>APLICACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....</b>	<b>102</b>
6.1	SELECCIÓN DE MEDIDORES EN LA PARTE DE AGUA TRATADA (APARTADO 5.2.1).....	102
6.2	SELECCIÓN DE MEDIDORES EN LA PARTE DE UTILIZACIÓN DIRECTA DE FRUCTOSA (APARTADO 5.4.2.3).....	109
6.3	SELECCIÓN DE MEDIDORES EN LA PARTE DE AGUA CRUDA .....	116
6.4	SELECCIÓN DE MEDIDORES EN LA PARTE DE JARABE SIMPLE.....	116

3

TESIS CON  
TALLA DE ORIGEN

6.5	SELECCIÓN DE MEDIDORES EN LA PARTE DE SANITIZANTE .....	117
6.6	SELECCIÓN DE MEDIDORES EN LA PARTE DE JARABE TERMINADO .....	117
6.7	SELECCIÓN DE MEDIDORES EN LA PARTE DE GAS CARBÓNICO .....	118
6.8	SELECCIÓN DE MEDIDORES EN LA PARTE DE BEBIDA TERMINADA .....	118
6.9	SELECCIÓN DE MEDIDORES EN LA PARTE DE INSPECCIÓN DE NIVEL DE LLENADO.....	118
	CONCLUSIONES .....	119
	BIBLIOGRAFÍA .....	121
	ANEXOS .....	I
	ANEXO A - APLICACIÓN DE TODOS LOS PASOS DE LA METODOLOGÍA AL AGUA CRUDA .....	II
	ANEXO B - APLICACIÓN DE TODOS LOS PASOS DE LA METODOLOGÍA AL JARABE SIMPLE .....	III
	ANEXO C - APLICACIÓN DE TODOS LOS PASOS DE LA METODOLOGÍA AL SANITIZANTE .....	IV
	ANEXO D - APLICACIÓN DE TODOS LOS PASOS DE LA METODOLOGÍA AL JARABE TERMINADO .....	V
	ANEXO E - APLICACIÓN DE TODOS LOS PASOS DE LA METODOLOGÍA AL GAS CARBÓNICO.....	VI
	ANEXO F - APLICACIÓN DE TODOS LOS PASOS DE LA METODOLOGÍA A LA BEBIDA TERMINADA .....	VII
	ANEXO G - APLICACIÓN DE TODOS LOS PASOS DE LA METODOLOGÍA A LA INSPECCIÓN DE NIVEL DE LLENADO .....	VIII

K

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## INTRODUCCIÓN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Se ha detectado que dentro de la industria nacional existe una falta de conocimiento de los principios físicos y eléctricos que utilizan los diferentes equipos empleados para la detección y medición de nivel y de flujo, así como de los alcances y limitaciones de cada uno de ellos. Una de las principales causas es la costumbre y apego del personal operativo de algunas industrias a utilizar métodos de medición manuales en lugar de utilizar dispositivos con principios de operación eléctrica o electrónica y esto aunado a que, por parte de los proveedores, en ocasiones no hay una presentación clara, simple y convincente sobre el funcionamiento y ventajas que tienen estos dispositivos para mejorar y simplificar procesos. Esto puede generar confusión o vacíos de información que llevan a una selección incorrecta de equipos de medición.

Una selección inadecuada de equipos de detección y medición de nivel y de flujo, trae como consecuencias:

- a) Una medición deficiente de una variable clave de proceso, con el riesgo inherente que esto pueda traer al proceso y la calidad del producto.
- b) Se incurre en inversiones equivocadas por la selección inadecuada del equipo de medición, lo que genera que se realicen nuevas inversiones para satisfacer la necesidad original que no fue abordada de manera adecuada.
- c) Se adquieren equipos de medición costosos que son subutilizados, teniendo alternativas más económicas y más adecuadas a las necesidades originales.
- d) Altos costos de mantenimiento dependiendo de los arreglos y tipos de medidores.
- e) Al utilizar diferentes tipos de sensores para el procesamiento de señales, no siempre se garantiza la interconexión de éstos con los sistemas de control de las plantas.

El presente trabajo pretende contribuir a la difusión de los diferentes principios físicos utilizados para la detección y medición de nivel y de flujo, así como sus alcances y limitaciones, con el fin de que se pueda llevar a cabo, de una manera ordenada basada en la metodología aquí expuesta, logrando la correcta selección y utilización de los diferentes

equipos de medición de nivel y de flujo disponibles en el mercado, para eliminar los problemas arriba mencionados y contribuir a mejorar la economía de las empresas, evitando inversiones injustificadas o equivocadas, reduciendo los costos de los proyectos y mejorando el control de los procesos, proporcionando una adecuada medición de nivel para su posterior control dentro de un proceso determinado.

El presente trabajo tratará un caso práctico de aplicación de lo expuesto. Este ejemplo se tomará del proceso de elaboración de bebidas, se presentarán sus necesidades de proceso, variables claves a controlar, y utilizando la metodología aquí desarrollada, se hará la selección y aplicación de los equipos de medición para cada parte del proceso. Se dará seguimiento al proceso desde las materias primas hasta llegar al producto terminado, cubriendo también los procesos intermedios y analizando en cada caso la selección de equipos de medición de flujo y nivel para cada aplicación.

Queda fuera del alcance de este trabajo analizar las posibles interacciones que se puede generar entre los diferentes sensores así como los diferentes sistemas de automatización y redes de comunicación por las que se maneja la información o señal obtenida, manejada y utilizada por los equipos de medición aquí expuestos.

## ANTECEDENTES

En una sola frase se pueden resumir una gran cantidad de razones por las cuales el tema de la medición se vuelve una necesidad en los procesos industriales:

*"Lo que no se puede medir no se puede controlar"*

Por esto, para poder obtener una calidad constante de producto, un tamaño de lote correcto, una concentración de material activo adecuada, una cantidad correcta de producto, una utilidad financiera por unidad, etc., se necesitan tener elementos de medición de nivel y de flujo.

Existe una amplia gama de técnicas de medición y no es siempre fácil para el usuario seleccionar el método más ventajoso dados sus requerimientos específicos, ya que difícilmente existen efectos físicos que no sean empleados como base de un método de medición.

Los principios físicos que son utilizados en los medidores pueden ser muy variados por lo que estos influyen en gran manera para la selección de un instrumento medidor, siendo algunas de las propiedades físicas empleadas como fundamento de su funcionamiento: el estado de la materia (sólido, líquido o gas), el color, la compresibilidad del material en recipientes a presión, la corrosividad, la densidad relativa y si ésta es constante o no, si se tiene una suspensión de sólidos en líquidos de manera uniforme, el peso del material, la conductividad, la capacitancia, la absorción de radiación o sonido, la opacidad, la viscosidad, etc.

Antes del advenimiento de la tecnología de los semiconductores, la mayoría de los métodos se basaban en principios mecánicos y/o hidráulicos, los cuales eran realmente sencillos, aunque muy inexactos; los métodos más comunes se basan en mediciones con mirillas de nivel, varillas de nivel y flotadores. Estos métodos, aunque son poco precisos, presentan la ventaja de ser muy sencillos de implementar, utilizar e instalar, así como de tener un muy bajo costo de compra y mantenimiento. Los métodos de mirillas o varillas son métodos tan simples, que no requieren realmente de un estudio, ya que escapan de ser usados por cualquier proceso industrial o que se encuentren bajo un mínimo de control. El

de flotadores arroja una mejor precisión versus su costo, por lo que es muy utilizado en grandes tanques contenedores de líquidos, en donde la exactitud no juega un papel relevante.

Con la incorporación de la tecnología de los transductores y la electrónica a las distintas aplicaciones de medición, otros sistemas fueron surgiendo o evolucionando a través del tiempo, siendo más comunes los métodos de desplazamiento, de tubería burbujeante, de presión estática, de pesas, de vibración retardada, rotación suspendida, plomada, nivel conductivo, absorción de radiación, capacitancia y nivel por reflexión. Cabe destacar que todos los métodos anteriores arrojan una gran precisión y son diseñados para ser conectados a sistemas electrónicos y ser empleados en conjunto con controladores, pero presentan la desventaja de aumentar los costos de instalación y mantenimiento por mucho, con respecto a los sistemas mecánicos o hidráulicos. Para seleccionar alguno de estos métodos es necesario tener un conocimiento más profundo del funcionamiento, condiciones bajo las cuales debe ser usado, el costo/beneficio del medidor, la facilidad de implementación, la factibilidad de utilización, etc., los cuales son el objeto del presente trabajo de investigación.

## OBJETIVOS

Los objetivos del presente trabajo son:

- a) Proveer una herramienta para la correcta selección y aplicación de los diferentes principios de medición de nivel y flujo en procesos industriales.
- b) Contribuir a la difusión de los diferentes principios físicos utilizados para la detección y medición de nivel, sus alcances y limitaciones, con el fin de que se pueda llevar a cabo, de una manera ordenada, la correcta selección y utilización de los diferentes equipos de medición de nivel y flujo disponibles en el mercado.
- c) Contribuir a cerrar la brecha tecnológica existente entre empresas industriales y proveedores de tecnologías de medición de nivel y flujo. Con frecuencia ambas se enfocan más en la parte comercial y tienden a descuidar la correcta selección y aplicación de los distintos principios de medición de nivel y flujo dentro de los procesos.
- d) Contribuir a la economía de las empresas, evitando inversiones injustificadas o equivocadas, reduciendo costos.
- e) Probar la metodología propuesta mediante su aplicación práctica en la selección y recomendación de los sensores para la medición de nivel y flujo a ser utilizados en un proceso industrial para la elaboración de bebidas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# CAPÍTULO 1

## PRINCIPIOS FÍSICOS UTILIZADOS EN LA MEDICIÓN Y DETECCIÓN DE NIVEL Y DE FLUJO

A continuación se presentan los diferentes principios físicos que son utilizados en la medición y detección tanto de nivel como de flujo.

### 1.1 MEDICIÓN Y DETECCIÓN DE NIVEL

Con el fin de medir y detectar el nivel de un líquido dentro de un tanque, es necesario conocer los diferentes principios físicos ya que éstos son la base para la selección correcta del método necesario.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### 1.1.1 PRINCIPIO FÍSICO DE CONDUCTIVIDAD

Una de las propiedades físicas que pueden tener los cuerpos y/o las sustancias es la de conducir la electricidad, la cual se presenta en mayor o menor grado en distintos materiales o sustancias, incluyendo fluidos.

Cuando se tiene un cilindro de material, ya sea sólido, líquido, gaseoso o la mezcla de ellos y en los extremos del mismo se aplica un voltaje dado, una corriente de energía eléctrica intentará pasar a través del material. Si la corriente eléctrica consigue viajar a través del material, se dice que se trata de un material conductor. A esta propiedad se le conoce como la conductividad eléctrica, la cual varía mucho entre producto y producto, y también depende de si se tiene en estado puro o si se encuentra mezclado.

El principio de conductividad en términos generales dice que la presencia de un material entre dos conductores hace variar la resistencia eléctrica entre estos.

Se requiere de una medición sencilla para verificar que un líquido sea lo suficientemente conductor para posibilitar el empleo de un instrumento por conductividad. Dentro de un

tanque, se aplica una corriente alterna pequeña a través de una varilla de metal (simulando un sensor) y la pared del tanque. Si se sumerge la varilla en un líquido y si la corriente y voltaje son conocidos, la resistencia verdadera del líquido se obtiene mediante la fórmula 1.1

$$R = \frac{V}{I} \quad \text{Fórmula : 1.1}$$

De donde:

$R$  = Resistencia [ohm]

$V$  = Voltaje [V]

$I$  = Corriente [A]

La determinación de la conductividad de un líquido, en micro-siemens, no es siempre un criterio confiable para determinar si es lo suficientemente conductivo ya que los parámetros tanto del área de superficie de contacto (del sensor o de la pared del tanque) como de la distancia (entre el sensor y la pared del tanque) pueden producir variaciones en los valores de conductividad.

Cuando un sensor no está en contacto con el líquido como se muestra en la figura 1.1 a), la resistencia eléctrica entre el sensor y la pared del tanque será muy alta o incluso infinita. Cuando el nivel del líquido sube para cerrar el circuito entre el sensor y la pared del tanque como se muestra en la figura 1.1 b), la resistencia será relativamente baja.

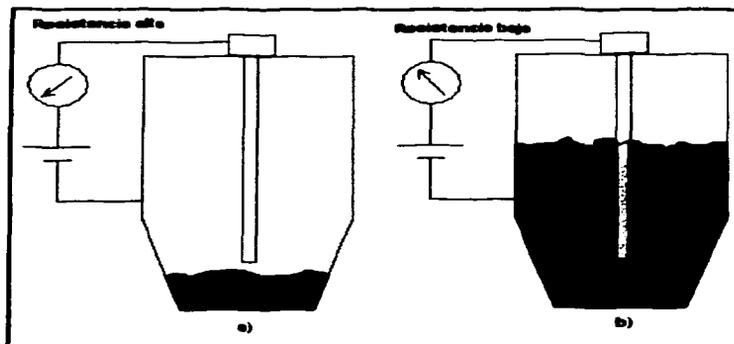


Fig. 1.1 – Principio de detección de nivel por conductividad

### 1.1.2 PRINCIPIO FÍSICO DE CAPACITANCIA

Un capacitor es un componente eléctrico capaz de almacenar o descargar una carga eléctrica y su principio fundamental se basa en los cambios en capacitancia. Un capacitor simple consiste de dos láminas de metal separadas por un aislante conocido como dieléctrico como se muestra en la figura 1.2.

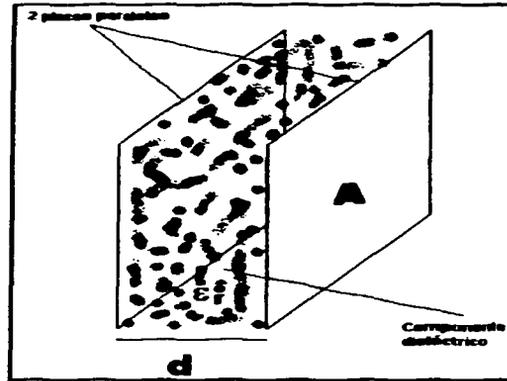


Fig. 1.2 – Capacitor simple

La capacitancia está en función tanto de la constante dieléctrica  $\epsilon_r$  del material como del volumen que se encuentra entre las dos placas, dada una diferencia de potencial constante a través de las placas.

El principio de capacitancia correspondiente a un capacitor cilíndrico es el que se utiliza en un sin número de industrias, dado que la mayoría de sus equipos de almacenamiento son de forma cilíndrica. La fórmula 1.2 indica cómo se obtiene la capacitancia de un capacitor cilíndrico como se muestra en la fórmula 1.2.

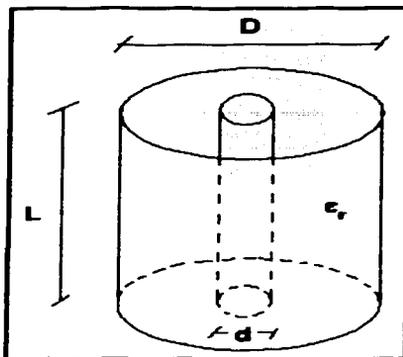


Fig. 1.3 – Principio de capacitancia usando un capacitor cilindrico

$$C = \frac{24 \cdot L \cdot \epsilon_r}{\left(\text{Log}(D/d)\right)} \quad \text{Fórmula : 1.2}$$

De donde:

$C$  = Capacitancia del capacitor [pF]

$A$  = Longitud del tanque [cm]

$d$  = Diámetro del sensor [cm]

$D$  = Diámetro del tanque [cm]

$\epsilon_r$  = Constante dieléctrica

Por definición, la constante dieléctrica del aire es 1. Cualquier otro material tiene un  $\epsilon_r$  mayor a 1.

Con el fin de medir el nivel de un líquido en un tanque se aplica el principio de capacitancia, el cual indica que una varilla de metal insertada y aislada del tanque y de la pared de éste, actúan como las placas de un capacitor, por lo que la capacitancia depende de la capa de líquido existente entre la varilla (sensor) y la pared. Cuando el tanque está vacío, sólo hay aire entre el sensor y la pared del tanque, por lo que la capacitancia del capacitor es baja. Sin embargo, la capacitancia aumenta cuando parte de la varilla está en contacto con un líquido. El cambio en capacitancia se convierte, a través de un amplificador, en una señal análoga de salida.

En resumen, la capacitancia determinada por el sensor de medición y el sensor de referencia, que usualmente es la pared del tanque, varía dependiendo de la presencia de líquido entre dichos sensores.

El principio de la detección de nivel se ilustra en la figura 1.4, en donde la unidad de oscilación se conecta a un amplificador con un cable de tres hilos. Dos conductores alimentan al oscilador mientras que el tercer conductor se usa para la señal.

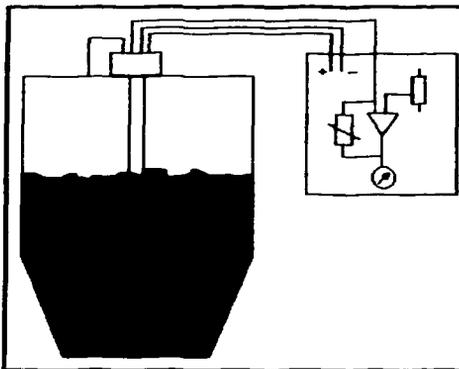


Fig. 1.4 – Principio de detección de nivel por capacitancia

### 1.1.3 PRINCIPIOS FÍSICOS DE RADIACIÓN, ULTRASONIDO Y MICROONDAS

Existen algunos principios físicos relacionados con la emisión de ondas de luz o sonido que pueden ser utilizados para detectar o medir nivel.

El principio de radiación indica que si una señal es emitida por un transmisor, ésta alcanzará un detector (receptor) sin impedimentos. Esta señal se absorberá incrementalmente a medida que el espacio que separa al transmisor (T) del receptor (D) es ocupado por un elemento distinto al aire, el cual absorberá parcial o totalmente la señal emitida. Ejemplos de lo anterior se muestra en las figuras 1.5. a) y 1.5. b).

La radiación gamma se adecua frecuentemente para altas temperaturas y presiones o productos muy grandes o pegajosos. Esto se debe a que la radiación gamma no requiere

equipo dentro del tanque pues penetra a través de la pared del mismo, como se muestra en la figura 1.5 b).

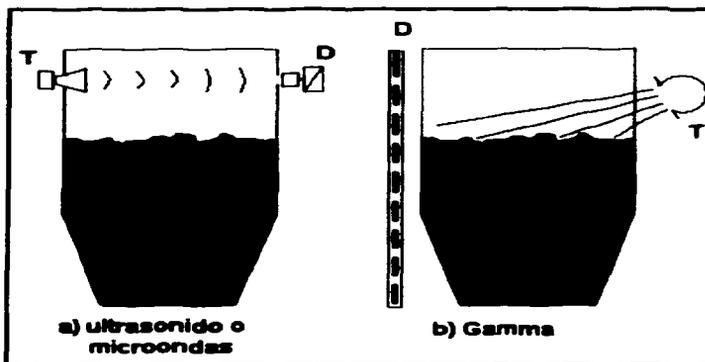


Fig. 1.5 – a) Detección de nivel utilizando un principio ultrasónico o de microondas;  
b) Medición de nivel utilizando un principio de radiación gamma

Se pueden también utilizar señales ultrasónicas o de microondas, sin embargo, las condiciones de proceso deben ser de baja presión, temperatura o corrosión.

Ordinariamente el sonido se define como una alteración ondulatoria que se esparce a través del aire, de líquidos o de sólidos, como ondas longitudinales de compresión. Los sonidos se miden en frecuencias de emisión, siendo la unidad de medida el Hertz. Cuando se trata de sonidos de muy alta frecuencia, éstos no pueden ser escuchados por el oído humano, pero finalmente las oscilaciones se encuentran presentes, denominándose a estos sonidos como Ultrasonidos. Estos se encuentran comprendidos por encima de los 20,000 Hertz.

Las ondas sónicas o ultrasónicas presentan la particularidad de que rebotan con obstáculos que se encuentren en su paso, de manera que pueden servir para medir distancias entre dos puntos. Básicamente existen dos modos diferentes de operación para hacer mediciones a través de ultrasonido. Uno de ellos comprende la medición de la diferencia en tiempo de recorrido para una señal ultrasónica que se desplaza desde un emisor hasta un receptor. La diferencia en tiempo de recorrido es proporcional a la velocidad con que las ondas ultrasónicas viajan a través del medio. Un esquema de lo anterior se presenta en la figura 1.6 .

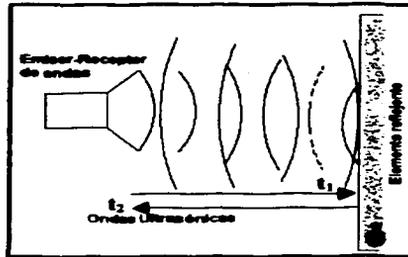


Fig. 1.6 – Esquema de un medidor de nivel ultrasónico

El segundo método está basado en el efecto Doppler. Este principio se describe en la sección 1.2 del presente trabajo.

#### 1.1.4 PRINCIPIO FÍSICO DE PRESIÓN HIDROSTÁTICA

Este método se basa en medir la presión hidrostática de una columna de líquido empleando un transductor de presión diferencial. El transductor debe montarse tan bajo como sea posible un tanque o contenedor. En la figura 1.7 se presenta un esquema de lo anterior.

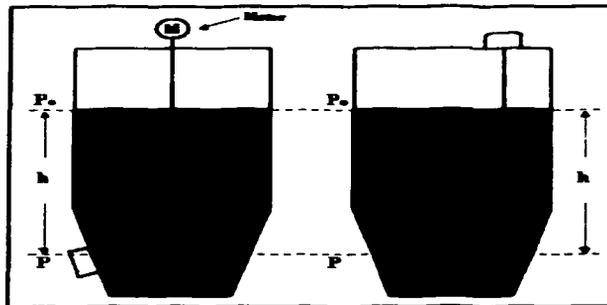


Figura 1.7 - Medición de la presión hidrostática ejercida por la columna del líquido

La presión hidrostática está dada por la fórmula 1.3.

$$P = \rho gh + P_0 \quad \text{Fórmula : 1.3}$$

De donde:

$P_0$  = Presión en la superficie ( $P_0 = 0$  para tanques no presurizados) [Pa]

$P$  = Presión hidrostática que ejerce la columna de líquido +  $P_0$  [Pa]

$\rho$  = Densidad del fluido [ $\text{Kg/m}^3$ ]

$g$  = Aceleración de la gravedad [ $\text{m/s}^2$ ]

$h$  = Altura de la columna del líquido [m]

Si la densidad del líquido es constante, la única variable en la fórmula 1.3 será la altura, por lo que el nivel del líquido dentro del tanque será directamente proporcional a la altura ( $h$ ) del líquido dentro del tanque.

Si se trata de un tanque presurizado, se sugiere un segundo transductor de presión diferencial, para que la presión ejercida en uno de los sensores de presión sea la presión de la columna de líquido más la sobrepresión del tanque. Si a esta medición se le resta la presión ( $P_1$ ) del sensor que se localiza en la sección superior que tiene la sobrepresión, el resultado será la presión de columna de líquido, la cual, como se mencionó, a densidad constante estará en función de la altura de la columna de líquido (ver figura 1.8). Con el fin de eliminar la necesidad de tuberías de igualación de presión, pueden emplearse dos transductores de presión electrónicos para medir la presión en la superficie y en el fondo del tanque, restando las señales resultantes en un amplificador.

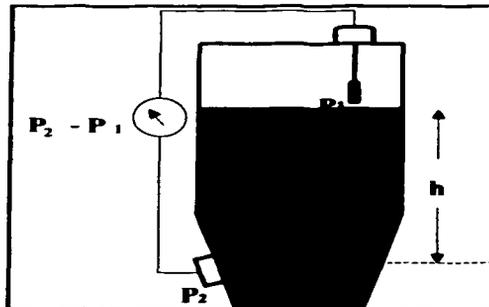


Figura 1.8 - Medición de la presión hidrostática ejercida por la columna del líquido

### 1.1.5 PRINCIPIOS FÍSICOS ELECTROMEQUÍNICOS

Algunos principios utilizados para la medición y detección de nivel por métodos electromecánicos son:

**Método de peso o celdas de pesado.** Consiste en montar un tanque sobre una báscula o en las llamadas "celdas de pesado". Los transductores de peso se basan en su mayoría en el principio del medidor de esfuerzo. Este método puede ser muy exacto para productos con densidades relativas constantes. Se mide el peso del contenido y se infiere el nivel como se ilustra en la figura 1.9.

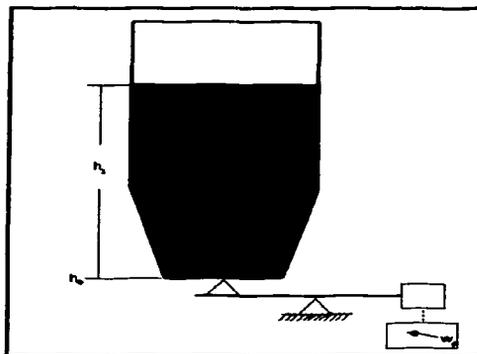


Figura 1.9 - Diagrama de un medidor de nivel por báscula

De donde:

$h_x$  = Altura de la columna de líquido [m]

$f_x$  = Fuerza ejercida por el peso del líquido [m]

$w_t$  = Peso del tanque ( $F_{\text{tanque}}$ ) + peso del líquido ( $F_x$ ) [N].

Aunque se trata de un principio electromecánico, en el fondo, este principio está en función de la variabilidad de uno de los componentes de la presión, la fuerza, la altura de la columna de líquido o producto, por lo que la fórmula 1.3 sigue siendo válida para este principio. La restricción será que la variable independiente sea solamente la altura, dicho de otro modo, que la densidad sea constante.

**Principios vibratorios.** Este método se basa en montar en el tanque o silo dispositivos vibratorios en cantiliver o suspendidos, los cuales se hacen oscilar a su frecuencia de resonancia. Cuando el material contenido en el tanque alcanza o libera al elemento vibratorio, la frecuencia de vibración es alterada, mandando una señal eléctrica a un relevador, si esto es conveniente como se muestra en la figura 1.10.

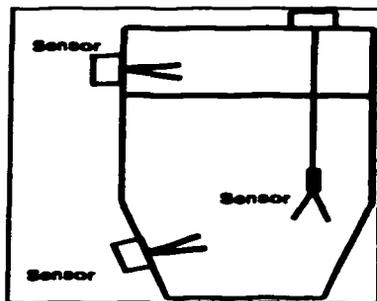


Figura 1.10 - Diagrama de detectores de nivel vibratorios

## 1.2 PRINCIPIOS FÍSICOS DE MEDICIÓN Y DETECCIÓN DE FLUJO

Con el fin de medir y detectar el flujo de un líquido o gas dentro de un entorno es necesario conocer los distintos principios físicos aplicables ya que éstos son la base para la selección correcta del método necesario.

### 1.2.1 PRINCIPIO FÍSICO DE ELECTROMAGNETISMO

El electromagnetismo se refiere a la relación existente entre el magnetismo y la electricidad, la cual fue descrita matemáticamente por Michael Faraday en la Ley de Inducción que lleva su nombre. Esta ley dice que al aplicar un campo magnético sobre un elemento conductor que se mueve dentro de dicho campo a una velocidad dada, induce (genera) un voltaje en dicho conductor. Siendo plasmada esta relación en la Ley de Faraday, la cual se muestra en la fórmula 1.4.

$$F_{em} = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad \text{Fórmula : 1.4}$$

De donde:

$F_{em}$  = Fuerza electromagnética [V]

$\Delta\phi$  = Variación del flujo magnético [A]

$\Delta t$  = Variación de tiempo [seg.]

El voltaje generado en el conductor es directamente proporcional al flujo magnético, pudiendo ser medido este voltaje al conectar los extremos del elemento conductor a un voltímetro, como se muestra gráficamente en la figura 1.11.

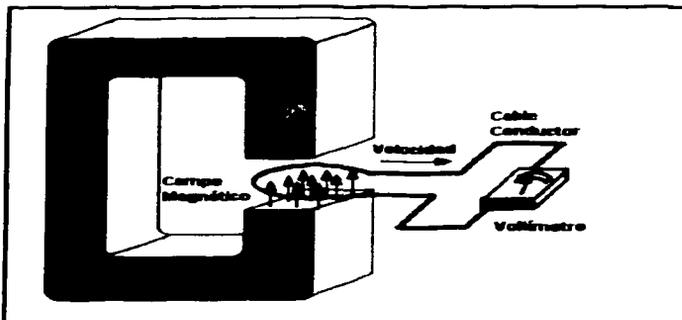


Fig. 1.11 - Relación electromagnética

Cuando el cable conductor atraviesa las líneas del campo magnético a una velocidad  $v$ , se induce un voltaje en el conductor, el cual es registrado por el voltímetro.

## 1.2.2 PRINCIPIO FÍSICO DE VÓRTICES

Un vórtice se define como el movimiento de una multitud de partículas fluidas alrededor de un centro común. Esto es, que un vórtice se forma cuando un fluido rota alrededor de un centro común para distintas capas del mismo, o lo que es lo mismo la formación de un torbellino o remolino.

TESIS CON  
EVALUACIÓN DE ORIGEN

El principio de formación de vórtices se utilizará como medidor de flujo, ya que la formación de los mismos depende de la viscosidad, la velocidad del fluido y el choque del fluido contra una superficie inmóvil dentro del torrente del flujo.

En la figura 1.12 se muestran dos ejemplos de vórtices en líquidos.



Fig. 1.12 - Formación de vórtices en líquidos

En la figura 1.13 se muestran dos ejemplos de vórtices en vapor (nubes).

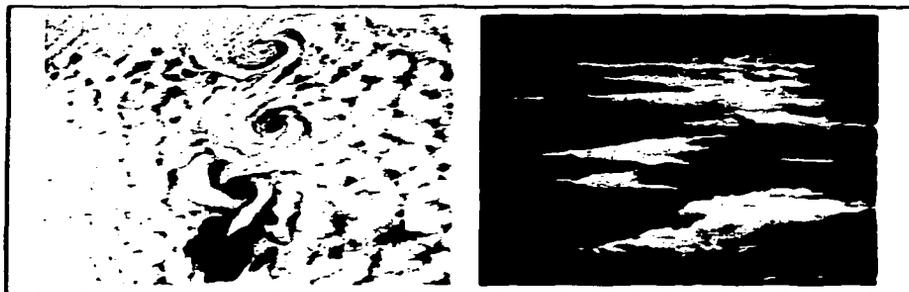
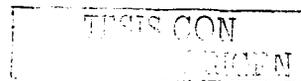


Fig. 1.13 - Formación de vórtices en vapores

### 1.2.3 PRINCIPIO FÍSICO DE ULTRASONIDO

Como se mencionó en la sección 1.1.3, las ondas sónicas o ultrasónicas presentan la particularidad de que rebotan con obstáculos que se encuentren a su paso, de manera que pueden servir para medir distancias entre dos puntos. Para medición de flujo, básicamente



existen dos modos diferentes de operación para hacer mediciones a través de ultrasonido. Uno de ellos, comprende la medición de la diferencia en tiempo de recorrido para una onda de sonido que se desplaza corriente arriba y corriente abajo entre dos estaciones medidoras. La diferencia en tiempo de recorrido es proporcional a la velocidad del flujo.

El segundo método esta basado en el efecto Doppler. Cuando una onda ultrasónica se proyecta en un fluido que no es homogéneo, parte de las ondas rebotan al transmisor a una frecuencia diferente (comimiento Doppler). La diferencia medida de frecuencia se encuentra directamente relacionada con la velocidad del flujo. En la figura 1.14 se muestra un esquema en el que desde un emisor se produce una onda ultrasónica, la cual es captada por un receptor más adelante sobre el camino del flujo.

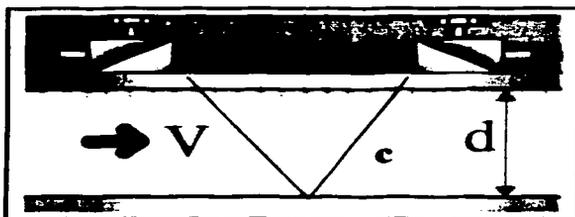


Fig. 1.14 - Efecto de rebote de ondas

#### 1.2.4 PRINCIPIO FÍSICO DE BERNOULLI

Bernoulli fue un matemático que pudo plasmar una ley que lleva su nombre en la cual menciona que un fluido que circula por una tubería o canal, al llegar a un punto en el que se reduce el diámetro o área por la que circula, éste tenderá a aumentar de velocidad y a reducir de presión. Esta relación se describe en la fórmula 1.5.

$$P + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = C \quad \text{Fórmula : 1.5}$$

De donde:

$P$  = Presión [ $N/m^2$ ]

$\rho$  = Densidad [ $Kg/m^3$ ]

$g$  = Aceleración de la Gravedad [ $m/s^2$ ]

$h$  = Diferencial de altura entre entrada y salida del fluido [m]

$v$  = velocidad del fluido [m/s]

$C = \text{Constante [Kg/m}^2\text{]}$

Esto quiere decir que a la entrada y salida de una tubería que cambia de diámetro, se mantiene constante la relación entre la presión, velocidad y altura, mediante la Ley de Bernoulli. Esta ley es muy utilizada en canales o tuberías tipo Venturi, los cuales como principio general se muestra en la figura 1.15, tratándose de una tubería que cambia de diámetros entre su entrada y salida.

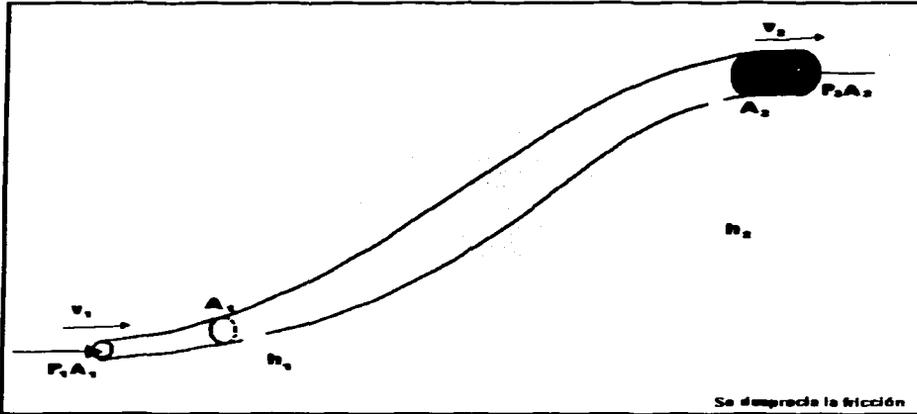


Fig. 1.15 - Tubo Venturi

Las áreas sombreadas representan el volumen aproximado de entrada y el de salida, denotándose que al aumentar el diámetro de la tubería, cambian los valores de la presión y de la velocidad del fluido, entendiéndose que se conserva la masa y la energía, por la ley del mismo nombre.

Al ser constante a lo largo de la tubería la relación expresada por Bernoulli, se puede expresar la fórmula 1.5 en la fórmula 1.6.

$$P_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad \text{Fórmula : 1.6}$$

De donde:

$P_1$  = Presión en el punto 1 [N/m<sup>2</sup>]  
 $\rho$  = Densidad [Kg/m<sup>3</sup>]  
 $g$  = Aceleración de la Gravedad [m/s<sup>2</sup>]  
 $h_1$  = Diferencial de altura del punto 1 [m]  
 $v_1$  = Velocidad del fluido en el punto 1 [m/s]  
 $P_2$  = Presión en el punto 2 [N/m<sup>2</sup>]  
 $h_2$  = Diferencial de altura del punto 2 [m]  
 $v_2$  = Velocidad del fluido en el punto 2 [m/s]

### 1.2.5 PRINCIPIO FÍSICO GIROSTÁTICO (ACELERACIÓN POR CORIOLIS)

El principio Girostático en conjunto con la acción de la Fuerza de Coriolis es empleado de manera efectiva en los sistemas de medición de flujo másico.

Considerando que la masa de un cuerpo puede ser determinada a partir de la aplicación de la segunda Ley de Newton (véase la fórmula 1.7). Esto es, mediante la medición de la aceleración causada por el efecto de una fuerza externa.

$$F = m \cdot a \quad \text{Fórmula : 1.7}$$

De donde:

$F$  = Fuerza [N]  
 $m$  = Masa [Kg]  
 $a$  = Aceleración [m/s<sup>2</sup>]

Al llevar a cabo la medición del flujo másico en líquidos en el interior de una tubería, es muy difícil obtener el peso del líquido, así como la aceleración del mismo, debido a que existen diversas variables como lo son: la velocidad del flujo, la densidad, la temperatura y la presión del fluido.

Para todos aquellos sistemas que rotan sobre un eje, la Fuerza de Coriolis es generada cuando una masa se mueve radialmente en el mismo sistema. Esto se puede apreciar en la figura 1.16. Si se sitúa una masa en un disco que se encuentra girando, ésta se moverá hacia el borde desde el centro, desplazándose siguiendo la ruta más corta hacia el extremo (radialmente), sólo si logra nulificar la fuerza que tratará de desviarlo ( $F_c$ ), como se ve en la fórmula 1.8.

TESIS CON  
FALLA DE COPIEN

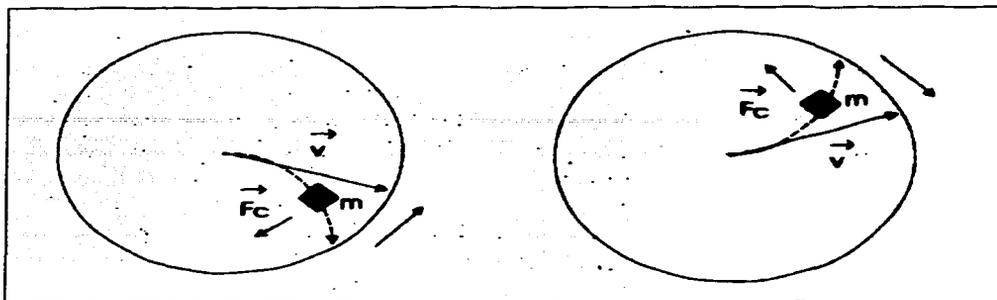


Fig. 1.16 - Descripción del Principio de Coriolis

$$F_c = -2m \cdot \omega \cdot v \quad \text{Fórmula : 1.8}$$

De donde:

$F_c$  = Fuerza de Coriolis

$\omega$  = Velocidad Angular [Rad/s]

$m$  = Masa [Kg]

$v$  = Velocidad [m/s]

### 1.2.6 PRINCIPIO FÍSICO DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO

Los medidores de flujo de desplazamiento positivo miden el índice de flujo volumétrico de un líquido o gas mediante la separación del flujo en volúmenes conocidos y contando dichos volúmenes. Se usan engranes, pistones o diafragmas para separar el líquido. Los medidores de flujo de desplazamiento positivo representan una de las pocas tecnologías que se pueden emplear para medir fluidos de alta viscosidad.

### 1.2.7 PRINCIPIO FÍSICO DE LÁSER

El principio de Láser junto con el Efecto Doppler son usados para la medición de flujo en los medidores conocidos como Láser-Doppler.

Las siglas del término LÁSER significan: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiations (amplificación de luz mediante emisión estimulada de radiaciones). El láser es un mecanismo generador de ondas electromagnéticas. Su funcionamiento se basa en el principio de Maser, el cual dice que al ser excitados por una fuente luminosa, los átomos de

TESIS CON  
PAPEL DE ORIGEN

un cuerpo absorben fotones y pasan a niveles energéticos superiores. Cuando la estimulación se interrumpe, los átomos se desprenden de los fotones y al regresar a su nivel de origen, devuelven el exceso de energía que absorbieron de las ondas electromagnéticas en forma de luz muy intensa, uniforme, concentrando esa luz dotada de una gran densidad de fotones y de un enorme poder energético. (Véase la figura 1.17)

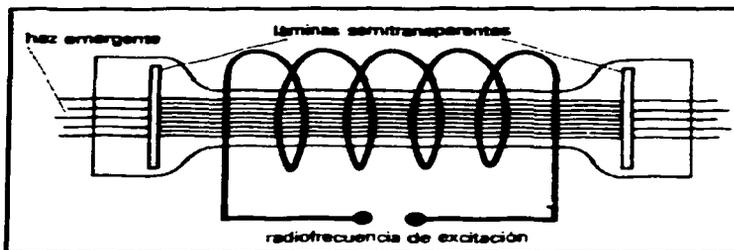


Fig. 1.17 - Láser de gas

Las características de la luz láser son:

- Altamente monocromática.
- Altamente direccional.
- Puede enfocarse con precisión.

### 1.2.8 PRINCIPIO FÍSICO DE EFECTO DOPPLER

Cuando una persona escucha un sonido y al mismo tiempo está en movimiento en la dirección a la fuente que lo produce, la frecuencia del sonido es mayor que cuando se encuentra en reposo. De manera contraria si la persona se aleja de la fuente que produce el sonido la frecuencia del mismo es menor. El cambio de frecuencia debido al movimiento relativo entre la fuente emisora y el receptor recibe el nombre de efecto Doppler y se aplica a todas las ondas en general.

El Efecto Doppler puede ser utilizado para la medición de flujo, tomando como base la variación en la frecuencia, como se muestra en la figura 1.18.

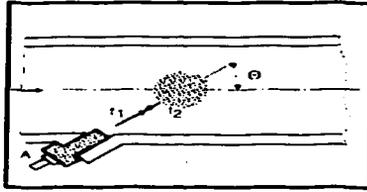


Fig. 1.18 - Señales reflejadas de partículas en el fluido

El medidor de flujo Doppler mide la velocidad de las partículas que están en movimiento con el flujo, transmitiendo señales acústicas de frecuencia conocida, las cuales son reflejadas y captadas por un receptor. Las señales recibidas son analizadas en busca de cambios de frecuencia y el valor promedio resultante de estos cambios de frecuencia se pueden relacionar directamente con la velocidad promedio de las partículas que se mueven junto con el flujo. (Véase fórmula 1.9)

$$f_1 - f_2 = \frac{2vf_1 \cos \theta}{a} \quad \text{Formula : 1.9}$$

De donde:

$$\frac{f_1 - f_2}{f_1} \ll 1$$

- $f_1$  = Frecuencia de Transmisión [Hz]
- $f_2$  = Frecuencia de Recepción [Hz]
- $a$  = Velocidad del sonido [m/s]
- $v$  = velocidad del área de reflexión [m/s]
- $\theta$  = Ángulo de Incidencia del láser [°]

## **CAPÍTULO 2**

### **MÉTODOS DE DETECCIÓN Y MEDICIÓN DE NIVEL**

Los elementos medidores de nivel determinan el volumen o la masa que existe dentro de un contenedor, siendo utilizados tanto en líquidos como en gases, entendiéndose que también pueden ser detectadas o medidas las mezclas de gases con líquidos o vapores.

Se han desarrollado múltiples medidores de nivel y principalmente su selección depende del tipo de tanque, del entorno en el que son instalados dichos tanques y de las condiciones de los líquidos o gases que en ellos se almacenan (viscosidad, temperatura, presión, etc.). Los medidores de nivel se clasifican por su principio de funcionamiento de la siguiente manera:

#### **2.1 MÉTODO DE DETECCIÓN DE NIVEL POR CONDUCTIVIDAD**

Dentro de un tanque en el que se quiere detectar el nivel de un líquido, la conductividad se forma entre la pared del tanque y un sensor aislado montado en el tanque o en la pared de éste. Si la detección de nivel de algún líquido se quisiera hacer en un tanque fabricado en material no conductor (por ejemplo plástico), se debe proveer una buena conexión a tierra que puede efectuarse a través de un cable conductor o una segunda sonda.

##### **2.1.1 MÉTODO DE DETECCIÓN DE NIVEL POR LÍMITE MÁXIMO O MÍNIMO**

Este método utiliza el principio de la variación de la resistencia entre dos conductores debido a la presencia de un líquido, la cual puede detectarse mediante un amplificador selectivo ajustable y puede utilizarse con el fin de activar una alarma o un control mediante un relevador o equipo de medición.

Para este proceso se debe aplicar corriente alterna y no corriente directa con el fin de prevenir la oxidación originada por efectos de electrólisis.

El diagrama básico de un circuito de detección de nivel por el método de nivel máximo o mínimo se muestra en la figura 2.1. La resistencia de un líquido  $R_x$  es conectada a un

punto de Wheatstone por medio de un sensor y de una conexión a tierra. Un potenciómetro  $R_v$  se usa entonces para balancear el puente, de forma que un relevador de salida sea desenergizado. Cuando el nivel del líquido alcanza el sensor, el valor de  $R_x$  cambiará y el puente se desbalanceará. Esto causará la energización del relevador.

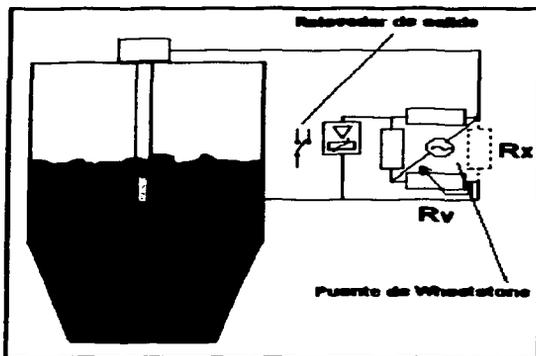


Fig. 2.1 – Diagrama básico de un circuito "límite máximo o mínimo"

### 2.1.2 MÉTODO DE CONTROL DE "DOS PUNTOS"

Este método, más que tratarse de un método de detección, es usado como método de control de nivel donde un segundo sensor puede emplearse con el mismo amplificador como se muestra en la figura 2.2. Se utilizan dos sensores para efectuar el control de nivel donde la diferencia entre el nivel de encendido y el de apagado es determinada por el largo de dichos sensores. El relevador de salida es energizado cuando el líquido hace contacto con el sensor más alto y sólo se desenergizará cuando ninguno de los dos sensores estén expuestos al líquido (tanque vacío o semi-vacío).

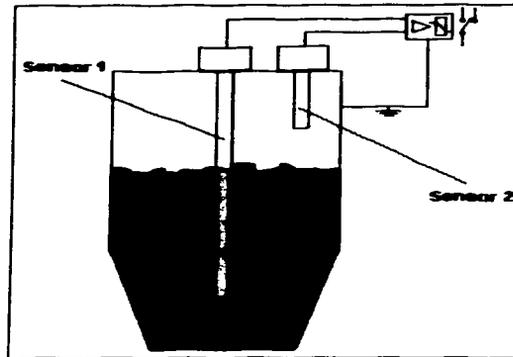


Fig. 2.2 – Diagrama básico de un circuito “dos puntos”

En caso de que el líquido genere espuma en su superficie, es necesaria una versión de baja resistencia. Esta versión debe ser capaz de detectar la diferencia entre el líquido en cuestión cuando el sensor está sumergido y una resistencia residual cuando el sensor se encuentra expuesto. Este proceso se utiliza en productos tales como leche, cerveza y bebidas carbonatadas.

Las características para el uso de este método son:

- Es un método simple.
- Es un método económico.
- El medidor puede contaminarse con grasa u otros depósitos.
- Su uso es limitado con el tiempo.

## 2.2 MÉTODO POR CAPACITANCIA

Dentro de un tanque en el que se quiere medir el nivel de líquido, el capacitor se forma por la pared del tanque y un sensor aislado montado en el tanque o en la pared de éste. En el caso de que el tanque no sea conductor, no ocasiona problemas ya que por ejemplo para tanques de plástico se puede colocar una tubería metálica alrededor del sensor o una lámina metálica fuera del tanque.

Dado que todos los líquidos tienen una constante dieléctrica mayor que la del aire, la capacitancia del sistema siempre será mayor cuando el sensor esté completamente cubierto con el líquido que cuando esté cubierto parcialmente o totalmente expuesto al aire como se muestra en la figura 2.3.

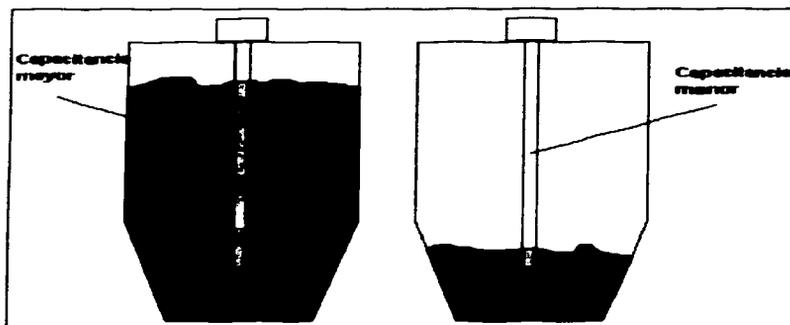


Fig. 2.3. – Método de medición de nivel por capacitancia

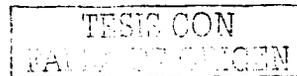
Este método de medición está basado en el cambio en capacitancia. Se coloca el capacitor en un circuito de corriente alterna de alta frecuencia de manera tal que el cambio en capacitancia, que representa el cambio en nivel, pueda convertirse en una señal eléctrica. Un capacitor en un circuito de corriente directa tendrá una resistencia infinita, mientras que en un circuito de corriente alterna la resistencia específica se conoce como reactancia.

### 2.2.1 EL CONCEPTO S.D.M (SUPERFICIE – DISTANCIA – MONTAJE)

Este concepto es un auxiliar en el diseño de un sistema de medición capacitivo o en la resolución de un problema en un sistema existente. Estos tres factores (SDM) son la clave para un sistema de medición capacitiva correcto.

#### Superficie

El cambio en capacitancia es usualmente muy pequeño cuando se usan líquidos con una baja constante dieléctrica y en aplicaciones donde el sensor es cubierto muy poco por el líquido. El cambio en capacitancia puede incrementarse simplemente aumentando el área



de la superficie del sensor. Una simple placa, tira o persiana puede unirse a un sensor parcialmente aislado como se muestra en las figuras 2.4 a – c

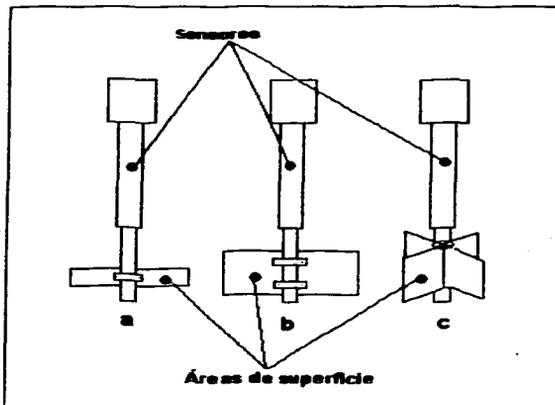


Fig. 2.4 – Diferentes ejemplos de áreas de superficie en sensores

Para líquidos conductores que tienen una alta constante dieléctrica no se requiere aumentar el área de superficie.

#### Distancia

Disminuyendo la distancia entre las superficies capacitivas (sensor y pared del tanque) puede aumentarse la capacitancia. Ya sea se puede variar la capacitancia disminuyendo dicha distancia o aumentando la superficie del área de los sensores.

#### Montaje

En caso de que se maneje dentro de un tanque un líquido que forme sedimento, las posibilidades de que se deposite sedimento en el acoplamiento son muy altas haciendo muy sensible al sensor tal y como se muestra en la figura 2.5 a), por ejemplo donde la relación  $D/d$  es más pequeña. Por tal razón, se puede evitar un incremento en la capacitancia por contaminación del acoplamiento haciendo el sensor parcialmente inactivo como se muestra en la figura 2.5 b).



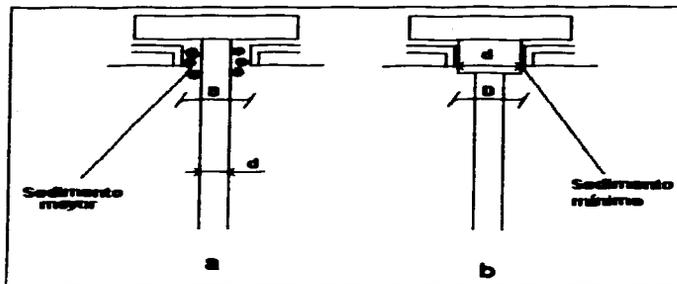


Fig. 2.5 – Diferentes tipos de montajes en función de la relación  $D/d$

Las características para el uso de este método son:

- Apto para usarse en líquidos y sólidos a granel.
- Adecuado para medios altamente corrosivos.
- Su aplicación es limitada a productos de propiedades eléctricas variables.

### 2.3 MÉTODO POR RADIACIÓN GAMMA

El método para la detección y/o medición de nivel de flujo se logra emitiendo un rayo de radiación gamma (siendo éste conocido como la fuente de rayos gamma "F") y colocando enfrente de la fuente un detector de rayos gamma "D" tal y como se muestra en la figura 2.6, el cual convertirá la señal recibida para transmitirla a un elemento de medición, relevador o transductor.

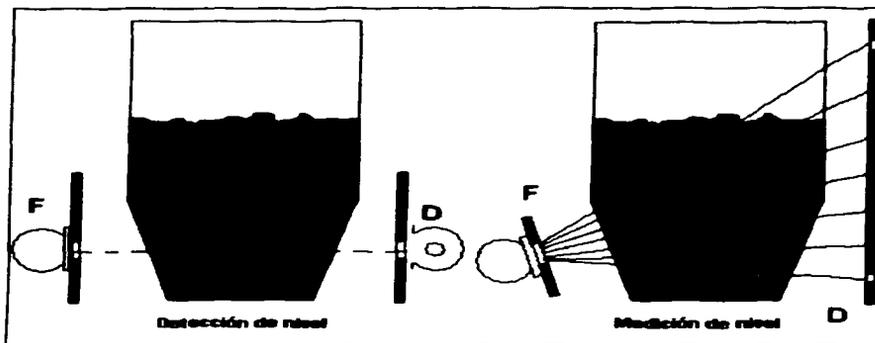


Fig. 2.6 – Método de detección y/o medición por rayos gamma

Cuando el tanque está vacío se debe ajustar la fuerza de la fuente de radiación con el fin de que el detector transmita justo los pulsos suficientes al amplificador para energizar el instrumento de detección o medición (por ejemplo un relevador). A medida que sube el nivel del líquido y se vaya obstruyendo el rayo gamma, la radiación se atenuará y por lo tanto el detector ya no transmitirá suficientes pulsos haciendo que el instrumento medidor o el relevador se desenergice.

Este método de medición de nivel a través de radiación gamma se emplea en situaciones en que los sensores u otros transductores no puedan colocarse dentro de un tanque por tratarse de líquidos muy corrosivos o extremadamente adhesivos o se trabaje bajo condiciones extremas (presiones o temperaturas muy altas).

En este tipo de equipos se emplea radiación gamma pura que no puede contaminar ni afectar el líquido de forma alguna. Este método de medición de nivel puede utilizarse, por tanto en industrias de alimentos o bebidas sin incurrir en riesgos. En la figura 2.7 se muestra un ejemplo de detección de nivel en el control del llenado de una botella de bebida gasificada, la cual produce espuma al ser llenada.

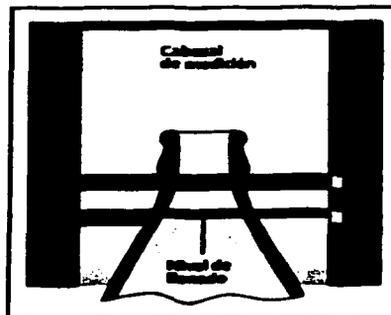


Figura 2.7 - Detección de nivel de llenado en una bebida gaseosa

De donde:

- 1 = Emisor de radiación por sobrellenado
- 2 = Receptor de radiación por sobrellenado
- 3 = Emisor de radiación para subllenado
- 4 = Receptor de radiación por subllenado

Las características para el uso de este método son:

- Es adecuado para varios tipos de líquidos.
- Puede montarse sin causar ninguna obstrucción.
- Los elementos de radiación gamma no requieren modificación alguna en el tanque.
- Se debe contar con el espacio externo al tanque para su instalación.
- Se requieren medidas de seguridad especiales debido a la radiación gamma.
- Es un sistema relativamente caro.

## 2.4 MÉTODO POR ULTRASONIDO

El método por ultrasonido se puede utilizar tanto para la detección como para la medición de nivel, de acuerdo con lo expuesto en la sección 1.1.3; en detección de nivel se utiliza la atenuación o absorción de la señal ultrasónica, mientras que en medición de nivel se basa en el reflejo de una señal sonora y su tiempo de viaje.

### Detección de nivel límite

Si el sistema se emplea para detección de nivel límite en sólidos a granel o en líquidos, se utiliza un transmisor (T) y un receptor (R) como lo ilustra la fig. 2.8. La membrana transmisora envía una vibración a la columna de aire entre transmisor y receptor, que a su vez ocasiona que la membrana receptora vibre a la misma frecuencia, siempre que no hay un producto que impida esta comunicación.

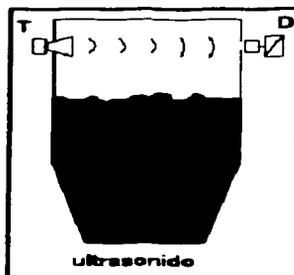


Fig. 2.8 – Método de detección de nivel por ultrasonido

Además del hecho de que un sistema de detección ultrasónico no tiene partes móviles y no entra en contacto con el producto, la mayor ventaja comparada con otros sistemas similares es que cualquier contaminación por polvo o humedad no tiene efecto en el sistema.

### Medición de nivel

En el sistema de medición de nivel con ultrasonido, el principio de operación, como se mencionó en la sección 1.1.3, se basa en la medición del tiempo de viaje de una señal sonora transmitida desde el sensor y recibida por el mismo sensor un tiempo después de ser reflejada por la superficie líquida o sólida, como se muestra en la figura 2.9.

La figura 2.9 ilustra las diferentes distancias involucradas en la medición de nivel por eco. Las distancias  $E$  = vacío y  $F$  = lleno, las conoce el usuario y se indican en el amplificador para fines de calibración. La distancia que va a viajar el pulso es  $2xD$  y la distancia  $M$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

también se ilustra en dicha figura. Z es una distancia específica para cada tipo de sensor, normalmente varía entre 3 y 12 cm.

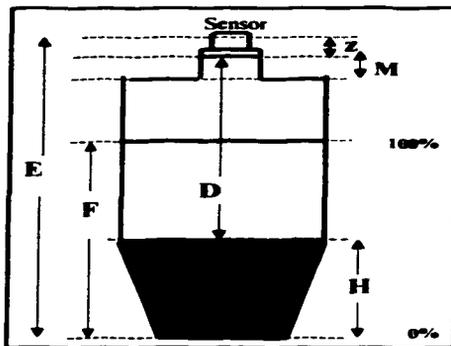


Fig. 2.9 – Método de medición de nivel por ultrasonido

La altura real del nivel del producto se representa finalmente mediante la fórmula 2.1:

$$H\% = \frac{(E - Z) - D}{F} \times 100 \quad \text{Fórmula : 2.1}$$

El tiempo de viaje de un pulso sonoro es una medida directa de la altura del producto en un tanque o silo, ya que la distancia recorrida por el pulso en metros, es igual al tiempo de recorrido en segundos, multiplicado por la velocidad del sonido en metros por segundo, siempre y cuando viaje a través del aire.

El sonido viaja a una velocidad de aproximadamente 331 m/s en el aire, a 0 °C. Esta velocidad es independiente de la presión del aire, pero es dependiente de la temperatura del mismo.

Si se cambia el medio a través del cual viajan las ondas sónicas (gases o vapores), la velocidad de estas últimas también variará.

$$t = \frac{2D}{v} \quad \text{Fórmula : 2.2}$$

De donde:

$t$  = Tiempo de viaje [seg]  
 $D$  = Distancia recorrida [m]  
 $v$  = Velocidad del sonido en el medio [m/s]

En la práctica, se utiliza una frecuencia de 2-10 Hz. dependiendo de la distancia máxima a medir.

### **Supresión de ecos erróneos**

La señal ultrasónica empleada para medición de nivel puede ser reflejada por entradas al tanque, vigas de refuerzo, juntas de soldadura, escaleras, etc. Para evitar la mala interpretación, estos ecos equívocos pueden suprimirse mediante la programación del equipo de medición.

Si la señal reflejada es lo suficientemente fuerte, el receptor seguirá el eco verdadero, sino el receptor seguirá buscando la señal hasta encontrar el eco real.

### **Montaje**

El sensor deberá montarse en una posición tal que no haya obstrucciones entre la superficie del producto y el sensor. Escaleras de acceso, elementos de inmersión, agitadores, entradas de bombas o un flujo de producto cayendo pueden producir ecos de interferencia. Frecuentemente estos pueden evitarse escogiendo una colocación diferente.

La unión entre el soporte y el techo del tanque deberá estar libre de rebabas de soldadura que pueden interferir con la señal. En la mayoría de los casos la distancia será muy pequeña para que haya interferencia directa con el eco, como sería dentro de la zona  $M$ , aunque si tal eco de interferencia se refleja dos veces, también puede evaluarse como un eco real.

Las diferencias de temperatura entre el producto y el ambiente pueden rápidamente resultar en la formación de condensación en el techo del tanque, el soporte y el sensor.

Esta condensación no ocasiona problemas en el caso de soportes de diámetro grande. Los soportes pequeños pueden mantenerse libres de condensación por ventilación natural, aislamiento térmico o calentamiento. Las gotas de condensado en la membrana normalmente no interfieren con la medición, aunque pueden producir una zona  $M$  ligeramente más larga y reducir la eficiencia de recepción.

Si no se puede encontrar un lugar óptimo para instalar el sensor, el rango aceptable de interferencia dependerá de las otras condiciones de medición tales como distancia a medir, ecos de interferencia, llenado de producto, formación de condensado y cambios de reflexión.

Se debe aclarar un punto adicional respecto a la posición del sensor y la reflexión cero. Si el fondo del tanque es de forma cóncava o si una pared se encuentra en un ángulo, el pulso sonoro será reflejado de esa superficie con ese mismo ángulo (el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión) y no regresará eco alguno al sensor. Esto causará que el amplificador emita una señal de alarma o que emita una señal máxima. En este caso hay peligro de que el eco de interferencia sea visto como un eco de la superficie del producto. En la mayoría de los casos este problema se puede resolver insertando un pequeño plato reflector al fondo de un tanque de líquido o colocando el sensor tal que reciba eco del fondo del tanque. La selección correcta de sensor y su posición pueden decidirse una vez que estas condiciones de operación y montaje se hayan examinado detenidamente.

### **Aplicaciones y calibración**

Los sistemas ultrasónicos pueden utilizarse en una amplia variedad de aplicaciones, desde medición de cambios en nivel del agua de 10 cm. para medición de flujo en canales abiertos, hasta la determinación de la cantidad de producto en un silo de cemento de 60 m. de alto. Es claro que con tantas aplicaciones diferentes, se requieren varios tipos de sensores y los correspondientes amplificadores. Para el primer ejemplo con pequeñas variaciones en nivel y una superficie líquida sin perturbaciones, el aspecto más importante de la medición es la exactitud. Mientras que en el segundo ejemplo, involucrando la medición de grandes distancias en condiciones muy desfavorables que incluyen ruido, polvo, llenado, interferencia y otros factores desconcertantes, se requiere que el sistema proporcione resultados confiables en condiciones críticas.

## **2.5 MÉTODO POR MICROONDAS**

El nivel de un producto en un tanque puede detectarse mediante un transmisor y un receptor de microondas.

Este sistema de detección de nivel consta de un transmisor, un receptor y una unidad con una fuente de excitación y un relevador, como se muestra en la fig. 2.10.

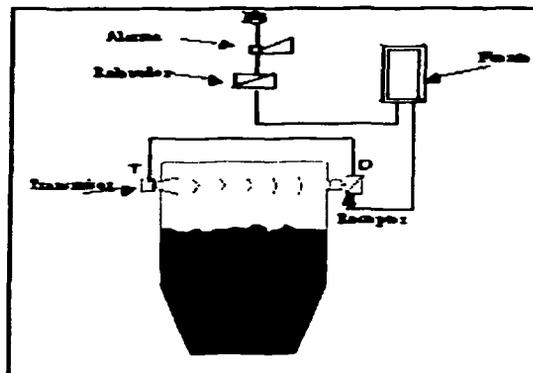


Fig. 2.10 - Sistema de detección de nivel por microondas

Un transmisor genera microondas en una cavidad conocida como resonador de cavidad. Un diodo Gunn y el resonador de cavidad forman un circuito de resonancia con una frecuencia típica de 5.8 GHz. (existen otros equipos que operan a mayores frecuencias). Esta señal de alta frecuencia se transmite en pulsos discretos con una frecuencia de pulso de 1 KHz.

Operando en intervalos cortos, el diodo Gunn puede generar una señal mas poderosa que si operara continuamente. Una apertura en la cavidad de resonancia está conectada mediante una guía de ondas rectangular a una antena en forma de embudo. La antena asegura que el campo electromagnético en la guía de ondas se transfiera al espacio libre, y el tamaño de la antena determina el ángulo del rayo.

Una antena bien diseñada evita pérdidas de radiación. La señal de la antena y de la cavidad de resonancia es recibida por otro tipo de semiconductor en el receptor, conocido como diodo Schotky. Cuando el rayo es interrumpido por amortiguamiento o absorción debida a la presencia de producto, el amplificador localizado en el receptor desenergiza un relevador. La longitud a la que las microondas son amortiguadas por un producto depende de su permisividad relativa (capacidad de absorción de las microondas). Entre más alta sea

esta permisividad relativa, mayor es el amortiguamiento de las microondas para un mismo espesor de material.

La tabla 2.1 indica el espesor de materiales que reducen el rango de microondas a la mitad.

Material	Espesor	Comentarios
Vidrio	7.44 mm	Dependiendo del contenido de plomo
Sulfato de bario	44 mm	
Asbesto	76 mm	
Triplay	100 mm	Dependiendo del contenido de humedad
Madera	230 mm	Dependiendo del contenido de humedad
Plástico antiestático	4 mm	
Hule	40 mm	Dependiendo del contenido de negro de humo

Tabla 2.1- Espesor de materiales

Los plásticos no conductores tales como el PVC, polietileno, PTFE (teflón) y poliéster tienen un efecto de amortiguamiento insignificante. El sistema de microondas es, por tanto, adecuado para detección de nivel no invasiva en contenedores plásticos cuyas paredes sean de varios centímetros de espesor.

Los materiales conductores reflejan la radiación bajo las mismas reglas que los rayos de luz, esto es, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Algunas veces se emplea más de un reflector como se muestra en la figura 2.11.

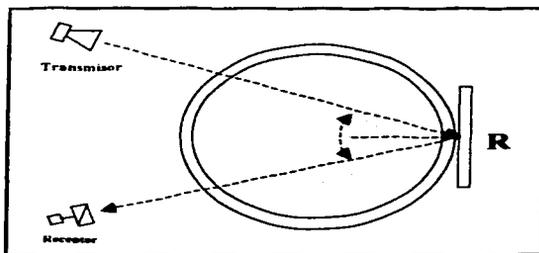


Fig. 2.11 - Sistema de detección de nivel por microondas, con reflector (R)

Deberá tenerse en cuenta que cada reflector absorberá aproximadamente 10% de la energía radiante. El reflector deberá tener un tamaño adecuado a la distancia sensor/receptor de acuerdo a la Tabla 2.2

Distancia (m)	Tamaño mínimo del reflector (mm)
0.5	200 x 200
1.0	400 x 400
2.0	800 x 800

Tabla 2.2 - Tamaño de reflectores recomendados

Un objeto también requiere un tamaño mínimo para interrumpir el rayo de radiación, dependiendo de la distancia entre transmisor y receptor. (Véase la tabla 2.3)

Distancia entre los sensores (m)	Tamaño mínimo de objetos (mm)
2	100 x 100
3	150 x 150
4	200 x 200
6	250 x 250

Tabla 2.3 - Tamaño de objetos detectables

Generalmente, las microondas no son afectadas por variaciones de humedad y temperatura, vapor, niebla o sequía.

### Montaje

Dado que las microondas están polarizadas, el transmisor y el receptor siempre deberán estar en el mismo plano. El transmisor y el receptor deberán estar directamente opuestos uno de otro para un rango óptimo de detección de señal.

El transmisor y el receptor no deberán estar montados en un lugar con vibración fuerte.

Deberán eliminarse reflejos contaminantes, por ejemplo, si se van a medir grandes distancias, el sistema ha de estar alejado al menos 1 m de cualquier superficie.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

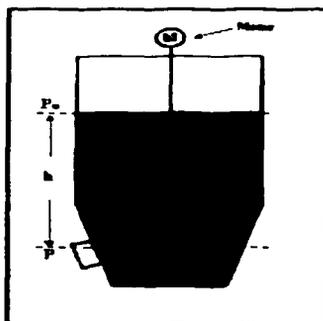
Dado que las microondas se reflejan de las superficies metálicas pero atraviesan plásticos, se deben usar ventanas de plástico para sensores montados en tanques de metal o silos.

Las características para el uso de este método son:

- Detección de nivel en materiales a granel y líquidos en contenedores o tanques de plástico.
- Detección de nivel de materiales a granel con partículas grandes en contenedores abiertos o camiones. La parte superior de la montaña de producto se detecta colocando el transmisor y receptor arriba del borde del contenedor.
- Dispositivos de seguridad para montacargas en plataformas de carga y descarga, túneles, etc.
- Monitoreo de claros de altura bajo puentes, etc.
- Monitoreo del contenido de cajas, botellas y tarimas.
- Detección de obstrucciones en tubos y salidas, detección de límite superior máximo en prensas de desperdicio de papel, plástico y textiles.

## 2.6 MÉTODO POR PRESIÓN

Como se mencionó en la sección 1.1.4, este método se basa en la medición de la presión hidrostática producida por una columna de líquido a una altura dada. Si la gravedad específica del líquido a medir no cambia, la única variable en el sistema es la altura. La presión será entonces directamente proporcional a la altura de la columna de líquido dentro del tanque, como se ilustra en la figura 2.12.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 2.12 - Medición de la presión hidrostática ejercida por la columna del líquido

Despejando la altura (h) de la fórmula 1.3 obtenemos la fórmula 2.1 siguiente:

$$h = \frac{(P - P_0)}{\rho g} \quad \text{Fórmula : 2.1}$$

De donde:

$P_0$  = Presión en la superficie ( $P_0 = 0$  para tanques no presurizados) [Pa]

$P$  = Presión hidrostática que ejerce la columna de líquido +  $P_0$  [Pa]

$\rho$  = Densidad del fluido [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]

$g$  = Aceleración de la gravedad [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]

$h$  = Altura de la columna del líquido [m]

El diagrama también muestra que la presión medida es igual a la presión de la columna de líquido más la presión de superficie. La presión de superficie en tanques abiertos a la atmósfera es igual a cero. Si la presión en la superficie del líquido es mayor que la presión atmosférica, la presión total será mayor que la de la columna de líquido.

### Aplicación práctica

Los sensores de presión consisten en una membrana sensitiva conectada mecánica o hidráulicamente a un transductor, generalmente del tipo semiconductor. El corazón de este sensor consiste de un substrato muy delgado que tiene varias resistencias montadas. Estas resistencias actúan como medidores en una configuración de puente de Wheatstone.

También se incorporan resistencias para corrección por temperatura. La presión del líquido es transmitida mediante una membrana flexible muy resistente a través de una cantidad muy pequeña de líquido de transmisión (generalmente lubricante de silicón) al transductor, como se muestra en la fig. 2.13.

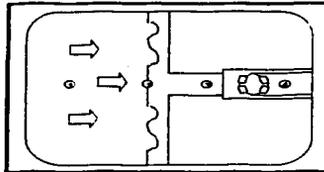


Figura 2.13 Esquema interior de un sensor de presión

De donde:

- 1 = Presión de proceso
- 2 = Membrana
- 3 = Líquido de transmisión
- 4 = Transductor

Al modificarse la presión se produce un cambio en la configuración de las resistencias en el transductor y por tanto también varía la resistencia a través del puente. Esta variación en resistencia se convierte en señal de medición que se transmite a un amplificador de medición remoto que suministra una salida de 0-20 o 4-20 mA para su lectura directa o procesamiento posterior.

El transductor de presión puede montarse en distintos tipos de sensores de presión, lo que permite elegir el más adecuado a las condiciones específicas de cada proceso. Dado que el movimiento de la membrana es sólo del orden de unas pocas micras, el transductor semiconductor es extremadamente insensible a la acumulación de suciedad o producto, aún en artículos tan viscosos como mayonesa, aceites, grasas, pintura, látex, lodos y aguas de desecho.

Se recomienda un montaje superior o lateral para fines de monitoreo y calibración, ya que se puede trabajar en el sistema sin interrumpir el proceso.

### **Aplicaciones**

Los sensores de presión son empleados en muchas ramas de la industria como medidores de nivel en tanques abiertos o presas. Pueden suministrarse para niveles de 0-1 m de columna de agua hasta 0 - 160 m con indicación de 0 - 100%. Los sensores de presión no son sensibles a cambios en conductividad o composición de producto, pero sí son sensibles a cambios en gravedad específica del producto ya que aunque se utiliza para medir nivel, en realidad mide presión. Esto es una ventaja en casos en los que se requiera medir peso.

La medición de presión diferencial además de utilizarse para determinar nivel en tanques presurizados, también se emplea para indicar el grado de ensuciamiento de un filtro. Si el filtro está limpio habrá diferencias despreciables en la caída de presión a través del filtro. A medida que el filtro se obstruya, la presión antes del filtro será cada vez más grande que la de atrás del mismo a consecuencia de la disminución del flujo.

Para aplicación en productos corrosivos donde la unidad de acero inoxidable estándar no sea suficientemente resistente, en el mercado se encuentran versiones en otros materiales con bases de montaje y bridas de plásticos resistentes a la corrosión.

Si estos modelos especiales no cumplen con los requerimientos anticorrosivos, la solución será usar el principio de tubo de burbujas, el cual se muestra en la figura 2.14.

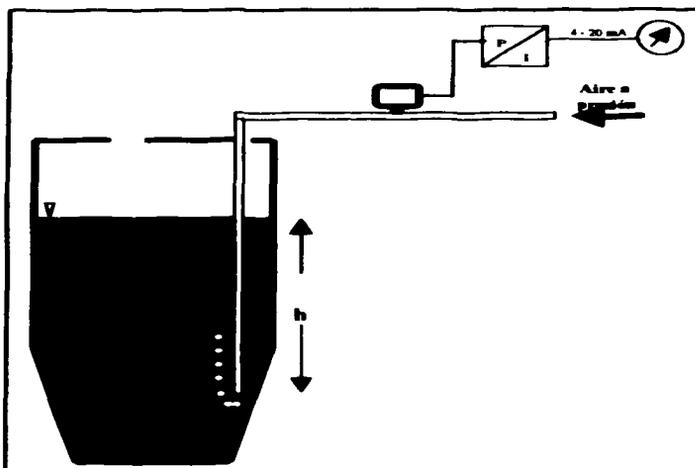


Figura 2.14 - Medición de nivel por el método indirecto de tubo de burbujas

En este caso se recomienda sumergir un tubo hecho de un material plástico resistente a la corrosión y conectar el otro extremo a un compresor pequeño y una válvula reductora. El compresor ejercerá justo la presión suficiente para exceder la presión de la columna de líquido, ocasionando el escape de burbujas. Esto provocará una presión posterior en el tubo igual a la presión ejercida por la columna del líquido. Esta es una forma de medir el nivel del líquido sin que el equipo entre en contacto con el mismo, siendo posible eliminar el problema de la corrosividad.

## **2.7 MÉTODO POR PRINCIPIOS ELECTROMECAÑICOS**

Los sistemas de medición de nivel basados en la conductividad o capacitancia del producto o en su densidad relativa, empleando desplazadores o métodos de presión pueden ser menos confiables en sólidos a granel debido a los efectos de diferentes condiciones variables, estos efectos pueden ser:

1. Cambios en el contenido de humedad o composición de un producto que alteren sus propiedades eléctricas.
2. Cambios en la densidad relativa y la densidad total debido a que el asentamiento del producto afecta sus propiedades mecánicas.

Adicionalmente a los factores mencionados, la presencia de espuma, turbulencia, burbujas de aire y partículas suspendidas, así como una alta viscosidad también deben tomarse en cuenta.

A través de los años, se han desarrollado cuatro tipos de sistemas de medición para hacer frente a estos factores. Estos son:

- a) Interruptores de medición de nivel basados en vibración mecánica y resonancia.
- b) Interruptores de nivel rotativos.
- c) Sistemas electromecánicos de plomada.
- d) Sistemas de flotadores y sistemas servo-balanceados.

### **2.7.1 DETECCIÓN DE NIVEL EN LÍQUIDOS EMPLEANDO RESONANCIA DE DIAPASONES VIBRATORIOS**

El interruptor de nivel límite vibratorio consiste de un dispositivo compacto formado por un diapasón simétrico de 100 mm de largo cuyos dientes son más anchos en los extremos. En la base cuenta con una membrana de 1 mm de ancho que forma parte del dispositivo de montaje de forma que únicamente una sola unidad se introduce en el proceso mismo. El diapasón es excitado por un cristal piezoeléctrico que vibra a una frecuencia de resonancia de 400 Hz en el aire.

El diapasón está diseñado de tal forma que al sumergirse en líquido habrá un cambio en su frecuencia de resonancia el cambio en la frecuencia se compara contra el valor de referencia y en función de la configuración del interruptor, se energizará o desenergizará un tiristor.

Una de las principales ventajas de este sistema de detección de nivel es que el no tiene partes móviles por lo que no requiere mantenimiento y que la carga externa puede ser un relevador directo, un indicador luminoso o una alarma, siempre que la corriente no exceda 350 mA. para voltajes de alimentación mayores a 24V y de 200 mA para un voltaje de alimentación de 24 V.

### Aplicaciones

En general el diapasón puede emplearse con todos los líquidos, jarabes, salsas y suspensiones siempre y cuando el acero inoxidable 316 sea aceptable, la temperatura del producto no exceda 150 °C y la presión del proceso no exceda 25 bares.

### 2.7.2 DETECCIÓN DE NIVEL EN SÓLIDOS A GRANEL UTILIZANDO EL DIAPASÓN

El producto consiste en el mismo diapasón pero con dos cristales montados en una membrana central. Uno de estos cristales se controla por un oscilador que causa que el sistema tenga resonancia cuando el diapasón está libre de producto.

Como resultado de la resonancia en la membrana, el segundo cristal producirá un voltaje pequeño que se transmite a un interruptor amplificador. Cuando el producto amortigua la vibración del sistema, el segundo cristal no produce más voltaje y el amplificador cambia de estado. El diagrama de un interruptor de nivel para sólidos se muestra en la figura 2.15.

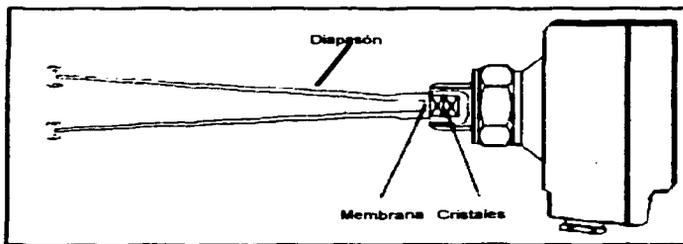


Figura 2.15 - Interruptor de nivel vibratorio

Dada la relativamente baja fuerza necesaria para amortiguar la frecuencia de resonancia, el diapasón vibratorio para detección de sólidos a granel es capaz de detectar niveles en productos con muy bajas densidades, tanto como 30 kg/m<sup>3</sup>.

La diferencia entre el diapasón vibratorio para materiales a granel y el vibratorio para líquidos es que el primero detecta un cambio de amplitud mientras que en el segundo un cambio de frecuencia activa el interruptor.

### Aplicaciones

Para detectar niveles límite en gránulos de poliestireno y otros plásticos, leche en polvo, detergentes, aserrín, etc.

### 2.7.3 SWITCHES DE NIVEL ROTATORIOS PARA MATERIALES A GRANEL

El momento de inercia de una paleta giratoria cambia dependiendo de si la paleta está en aire o en contacto con un producto.

#### Aplicación práctica

Un pequeño motor sincrónico con transmisión hace que una paleta montada en una flecha gire dentro de un silo. Cuando la paleta encuentra resistencia del producto, la transmisión que está montada en un cojinete se mueve. Los microswitches localizados para detectar éste movimiento cambiarán de estado. Cuando el producto ya no ejerce resistencia contra la paleta, la transmisión regresa a su posición original y el contactor restablece el motor mientras que otro indica el cambio de nivel, ver la figura 2.16.

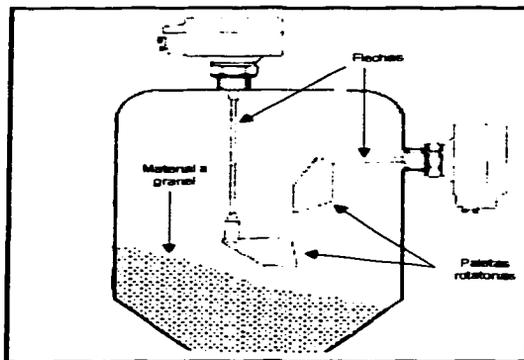


Figura 2.16 Interruptor de nivel de paletas

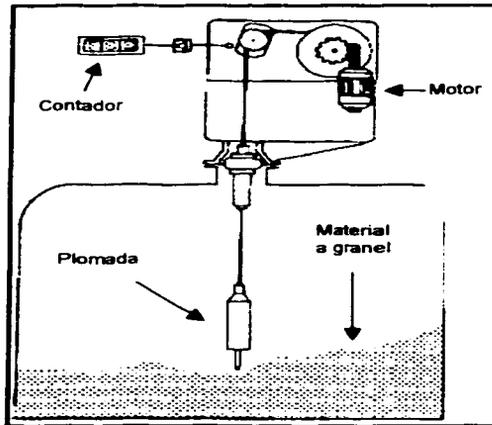
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Este medidor de nivel se utiliza en casos en que la acumulación de producto es probable ya que no es sensible a ella.

#### 2.7.4 SISTEMAS ELECTROMECAÑICOS DE PLOMADA

Una plomada se hace descender desde la parte superior de un silo hasta la superficie de un producto. La diferencia con la altura del silo en vacio será el nivel de producto.

El medidor consiste de un peso sensible suspendido dentro del silo en un cable enrollado en un riel motorizado y un contador de pulsos que permite conocer la distancia recorrida por el peso suspendido (plomada). La figura 2.17 presente un esquema de un medidor de nivel electromecánico por plomada.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 2.17 - Medidor de nivel electromecánico por plomada

Cuando se arranca el equipo manualmente (o automáticamente mediante un relevador de tiempo) el contador de pulsos se restablece a la altura total del silo y el motor baja un peso sensible. Una rueda medidora envía un pulso por cada centímetro que el peso viaja, que se resta de la lectura en el contador. Cuando el peso entra en contacto con la superficie del producto, el cable se afloja lo que ocasiona que el motor pare. El contador de pulsos para y el cable se vuelve a enrollar en el riel. El peso entonces se mantiene en la parte

superior del silo y el contador se mantiene en la última medición de altura hasta que se da una señal de que la medición se repita.

Estos equipos se utilizan para grandes distancias y son capaces de medir hasta distancias de 70 m.

El cable puede ser de acero inoxidable de alta resistencia a la tensión para condiciones difíciles (gran altura, materiales "sucios") o de baja resistencia para condiciones no demandantes. El cable se utiliza para caliza, grava, carbón, mineral de hierro, etc. Modelos con cuerda pueden emplearse para harina, granos de plástico, cemento, etc.

Se utilizan diferentes formas de los pesos según el tipo de producto en el silo: acero, flotador, bolsa de lino, paracaídas, etc.

A pesar de que el número de partes móviles es bajo (la rueda medidora y el riel del cable) el equipo requiere de mantenimiento considerable. Este equipo es adecuado y económico para medición de material a granel y líquidos en silos altos y tanques. Su exactitud de +/- 100 mm.

Los criterios para seleccionar el modelo apropiado son:

- a) Temperatura ambiente máxima
- b) Presión máxima
- c) Productos permisibles
- d) Categoría de inflamabilidad en atmósfera
- e) Lectura requerida en decímetros, centímetros o análoga
- f) Accesorios opcionales requeridos
- g) Altura a medir

## **2.7.5 SISTEMAS ELECTROMECAÑICOS PARA MEDICIÓN DE NIVEL EN LÍQUIDOS**

El sistema del flotador para medición de nivel se emplea generalmente en grandes tanques. Provee una alternativa para los laboriosos y frecuentemente peligrosos métodos manuales. Estos sistemas son operados en forma totalmente mecánica y existen otros más avanzados que utilizan servo balanceadores. Este arreglo se muestra en la figura 2.18.

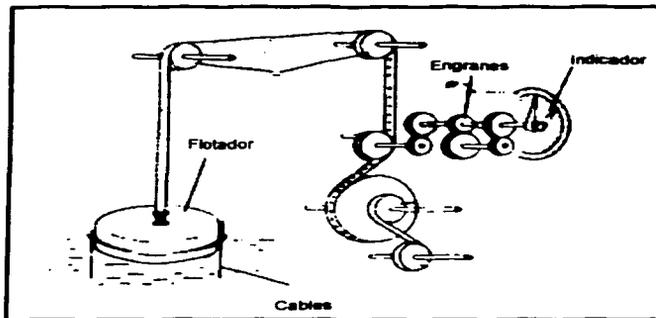


Figura 2.18 - Sistema del flotador para medición de nivel

En el sistema puramente mecánico, un flotador relativamente grande se mueve hacia arriba y hacia abajo con el nivel del líquido almacenado gracias a dos cables montados en un sistema de anillos guías. Los cables se encuentran firmemente anclados al fondo del tanque y se mantiene en tensión permanente por dos tensores montados en la parte superior del tanque.

En lugar de los cables guía, puede emplearse un flotador pequeño en un tanque. El flotador está conectado al instrumento indicador (fuera del tanque) por un cable de acero inoxidable en poleas.

El indicador tiene una polea manejada por resortes que mantiene el cable bajo tensión enrollándolo hacia arriba a medida que el flotador sube. El cable está perforado y mueve un medidor de engrane. Un sistema de engranes conecta la rueda medidora con el indicador.

La exactitud del sistema es relativamente alta,  $0.5 \text{ mm} \pm 0.15 \text{ \%/m}$  del nivel medido. La tensión ejercida por la polea sobre del cable varía a medida que el nivel sube y baja, esto compensa automáticamente la variación aparente en peso del cable cuando es rembobinado.



Si los indicadores pueden situarse en la tapa del tanque, el sistema tendrá mayor grado de exactitud, ya que no se requieren poleas y el cable es más corto.

El sistema puede ampliarse para incluir una alarma y un transmisor análogo. Estos están conectados al instrumento a través de una flecha y suministran entre 2 y 6 contactos de alarmas ajustables a través de todo el rango y/o una salida análoga de 0-500 Ohm, 0-20 ó 4-20 mA.

El sistema de medición servo-balanceador consiste de una servo unidad y un indicador montado en un tanque, un flotador, suspendido por dos cables de acero inoxidable, descansando en el líquido y un instrumento indicador remoto. Adicionalmente a los datos de nivel, la unidad indicadora también tiene la facilidad de procesar datos de temperaturas del tanque gracias a un sensor de temperatura y transmitir estos datos a un indicador remoto. La medición de la temperatura se utiliza para compensar por la expansión del producto cuando se requiere una medición de nivel muy exacta.

La exactitud de este sistema es  $1 + 0.005 L$  mm, donde L es el nivel medido en metros. Este alto grado de exactitud se logra a través del uso de un sistema de detección de resortes que puede mostrar una diferencia en fuerza en el flotador de  $\pm 2.7g$ . Esta exactitud es la misma para lecturas remotas empleando un microprocesador y el sistema de transmisión digital.

## CAPÍTULO 3

### MÉTODOS DE DETECCIÓN Y MEDICIÓN DE FLUJO

Los elementos medidores de flujo, también conocidos como medidores de caudal, determinan el volumen o la masa que fluye o pasa por un punto dado en un canal o tubería, siendo utilizados tanto en líquidos como en gases, entendiéndose que también pueden ser medidas las mezclas de gases con líquidos o vapores. Este flujo o movimiento de volumen es originado por un par de razones, siendo éstas: la caída del fluido por gravedad o por los diferenciales de presión existentes dentro de una tubería. Estos diferenciales de presión o la acción de la gravedad provoca un movimiento en el fluido a una cierta velocidad, la cual es un indicador del caudal o flujo, ya que sabiendo la velocidad del líquido o gas y el área transversal por la que circula el mismo se puede determinar el flujo volumétrico, el cual es expresado con la fórmula 3.1:

$$Q = v * A \quad \text{Fórmula : 3.1}$$

De donde:

$Q$  = Flujo en el Canal o Tubería [ $m^3/s$ ].

$v$  = Velocidad del fluido [ $m/s$ ].

$A$  = Área transversal por la que pasa el fluido [ $m^2$ ].

Se han desarrollado múltiples medidores de flujo para sistemas en los que se tienen tuberías cerradas sobre las que se colocan estos instrumentos. Los medidores de flujo se clasifican como se muestra en la figura 3.1.

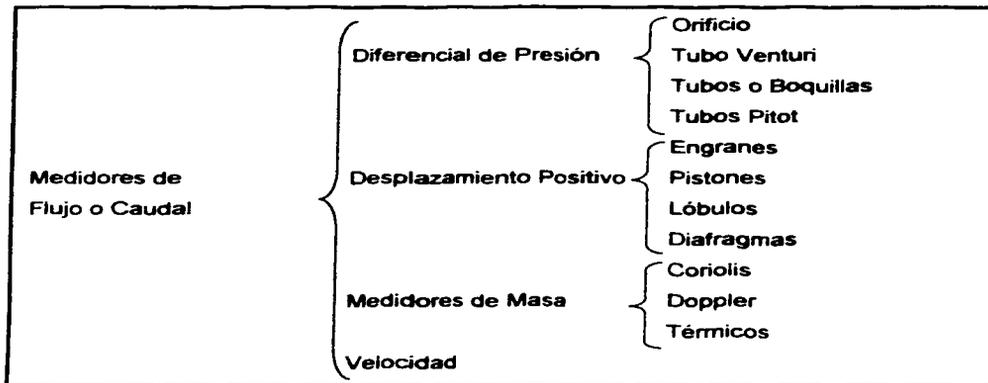


Fig. 3.1 - Clasificación de los medidores de flujo

En las últimas décadas se ha ido revolucionando el campo de la medición de flujos por varias razones:

- Incrementos de costo en energéticos originando que en las plantas se lleve a cabo mejoras sustanciales en los procesos productivos.
- Incrementos en los costos de mano de obra versus la disminución por automatización. Lo cual ha motivado el desarrollo de medidores de flujo que puedan arrojar lecturas o señales que entiendan los elementos controladores de los procesos.
- Mejoras en la seguridad de los equipos de manera que se reduzcan accidentes humanos o de daños ecológicos, además de los económicos. Esto propicia que se coloquen más y mejores elementos de medición en los procesos.
- Para sistemas tan simples como el probar la eficiencia volumétrica de una bomba impulsora del fluido o el encontrar fugas del mismo dentro del sistema.
- Porque permite tener una mayor precisión en el mezclado continuo.

Por todas estas razones se requieren tener elementos medidores de flujo que sean más precisos y en cierta manera autocalibrados, los cuales proporcionen como salida señales eléctricas que puedan ser entendidas por los controladores de procesos. Han sido estandarizadas las señales eléctricas de salida de manera que se tenga una reglamentación en la construcción y utilización de estos aparatos y se ha expandido el número de competidores en el mercado de elementos medidores de nivel y flujo.

repercutiendo en economías de escala que finalmente abaratan los precios de los mismos en el mercado, de manera que la tecnología se hace más asequible a todo tipo de empresas.

Los medidores de flujo (volumétrico y másico) más comunes serán descritos a continuación, dependiendo de si son usados para medir líquidos o gases. Como principio general es más sencillo el medir el flujo de un líquido a través de una tubería, debido a su propiedad de incompresibilidad, no siendo igual de sencillo cuando se quieren medir los flujos de gases o vapores, ya que éstos son compresibles.

### **3.1 MEDICIÓN DE CAUDAL O FLUJO**

Primeramente se define el concepto de caudal o flujo volumétrico como:

*"La medida del volumen de fluido que pasa por un punto dado en un tiempo determinado."*

Siendo afectado por la velocidad que lleva el mismo fluido. Esta velocidad esta definida como:

*"La rapidez promedio de las partículas de un fluido al pasar por un punto determinado."*

O lo que es lo mismo:

*"La distancia promedio que viajan las partículas por unidad de tiempo."*

Con el entendimiento de este concepto, se puede mencionar que para seleccionar un medidor de caudal que se use en una aplicación específica, se deben observar las condiciones de diseño para hacerlo compatible con el fluido y el arreglo en donde se colocará, además de que los distintos fabricantes de medidores utilizan distintos principios físicos para obtener la medida del caudal. Por ejemplo, existen factores que afectan al flujo en los líquidos, los cuales son: la viscosidad, la densidad y el coeficiente de fricción del líquido al entrar en contacto con la superficie interior de la tubería. No todos los líquidos, ni todos los gases, ni todos los vapores se comportan de la misma manera y mucho menos si se emplean bajo distintas condiciones de operación como son: presión, temperatura y velocidad.

Los medidores de flujo más comunes son los: Electromagnéticos, de Vórtices y de Desplazamiento Positivo, siendo estos mencionados en los siguientes puntos de este apartado.

### 3.1.1 MEDICIÓN POR ELECTROMAGNETISMO

Los elementos medidores de flujo mediante electromagnetismo son aquellos en los cuales se aplica un campo magnético alrededor de la superficie por la que fluye un producto, teniendo un sensor que recibe una señal (voltaje) desde el líquido que está fluyendo, así como un amplificador de la señal que convierte a ésta en una corriente normalizada de salida o en pulsos por unidad de volumen o por unidad de tiempo.

Estos elementos medidores utilizan como principio básico de medición a la Ley de Faraday, la cual dice que si un conductor (el líquido) es movido o desplazado dentro de un campo magnético, un voltaje en dicho conductor es generado, es decir, lo que se expresa matemáticamente en la fórmula 3.2.

$$U_e = B * L * v \quad \text{Fórmula : 3.2}$$

De donde:

$U_e$  = Voltaje Inducido [V]

$B$  = Fuerza del campo magnético o inducción [A]

$L$  = Largo del conductor (distancia entre electrodos) [m]

$v$  = Velocidad del conductor (velocidad promedio del fluido) [m/s]

En el caso de la medición magnética, el conductor es el mismo líquido que fluye en una tubería, de forma que la medición se lleva a cabo al momento que se colocan dos bobinas o polos a ambos lados de una tubería los cuales son energizados con una corriente alterna (AC) o con una corriente directa (DC) con una señal de pulsos. El campo magnético inducido por las bobinas, que se encuentran en los extremos de la tubería, produce un voltaje en el líquido conductor, el cual es recuperado mediante dos electrodos aislados que se conectan a un multímetro o elemento de control y a su vez en un amplificador de señal, quedando el eje de los electrodos, el campo magnético y la dirección del flujo de forma perpendicular uno con los otros. El aislante interior del tubo evita que fluya la corriente a través del cuerpo de la tubería, por lo que se mide el voltaje inducido en el líquido. Un bosquejo de este arreglo se muestra en la figura 3.2.

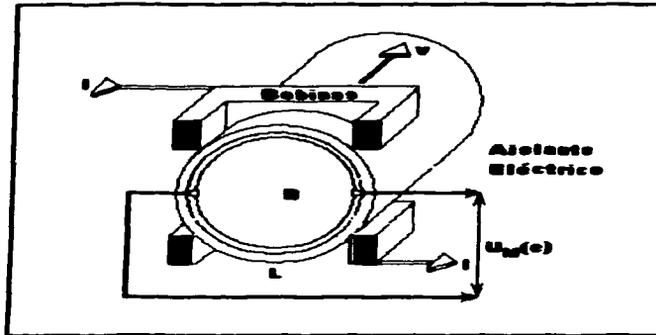


Fig. 3.2 - Principio de operación del medidor electromagnético

El voltaje que se induce entre los electrodos es directamente proporcional a la Inducción  $B$ , a la velocidad del flujo conductor  $v$  y a la distancia que existe entre los electrodos  $L$ . Al considerar que la Inducción  $B$  y la distancia entre los electrodos  $L$  es constante, se puede re-escribir la fórmula 3.2 en los términos de la fórmula 3.3:

$$\begin{aligned}
 \text{Si } v &= \frac{V}{A} \\
 U_e &= B * \frac{V * 4}{D^2 * \pi} \quad \text{Fórmula : 3.3}
 \end{aligned}$$

De donde:

$D$  = Diámetro Interno del tubo [m]

$B$  = Inducción [A]

$v$  = Velocidad del fluido conductor [m/s]

$A$  = Área transversal [m<sup>2</sup>]

$V$  = Flujo [m<sup>3</sup>/s]

$L$  = Distancia entre electrodos [m]

$U_e$  = Voltaje Inducido [V]

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Los medidores de flujo magnético utilizan una tubería no conductiva, por lo menos en el punto donde se lleva a cabo la medición, para poder inducir el campo magnético, ya que de

no ser así, habría una corriente que se transmitiría por la tubería en vez de inducir un campo magnético.

El amplificador convierte los pequeños cambios de voltaje en una señal que es utilizable con los elementos controladores.

En ocasiones existen interferencias que se originan en el tipo de líquidos que se analizan, ya que existen diferencias de potenciales electroquímicos. Estas distorsiones o interferencias pueden ser eliminadas mediante la utilización de acoplamientos de capacitores entre los electrodos y el amplificador.

Todos los líquidos que tienen presencia de agua en su composición pueden ser medidos por medio del principio electromagnético, ya que el agua es conductora, no siendo así en otros fluidos, como por ejemplo líquidos derivados del petróleo, ya que éstos tienen una muy baja conductividad eléctrica.

Los instrumentos pueden ser colocados en cualquier punto de la tubería, pero aún así se sugiere que se instale sobre la tubería de manera vertical y que se mantenga lejos de posibles generadores de turbulencias dentro de la tubería.

Las ventajas de utilizar los medidores basados en principios electromagnéticos son principalmente:

- Mediciones no afectadas por propiedades bajo el cual está fluyendo el fluido como son presión, viscosidad o temperatura. No existe caída o aumento de presión ya que no hay modificaciones en el diámetro de la tubería.
- No se tienen partes mecánicas que se encuentren en movimiento, por lo que no existe corrosión o abrasión de los elementos, dando ahorros en el mantenimiento de estos equipos.
- Son ideales para mediciones de flujo en líquidos contaminados, con alto contenido de sólidos en suspensión o en fluidos abrasivos.
- Tienen un amplio rango de aplicación, en cuanto a los diámetros de las tuberías en las que se hacen las mediciones, presentando excelente exactitud aún en diámetros grandes.

Las limitaciones que presentan los medidores electromagnéticos son:

- Solamente se pueden aplicar en líquidos que sean conductivos.

- En base a las especificaciones y/o limitaciones técnicas del fabricante, en cuanto a presión y temperatura.

En la figura 3.3 se presentan ejemplos de medidores comerciales de flujo electromagnéticos:

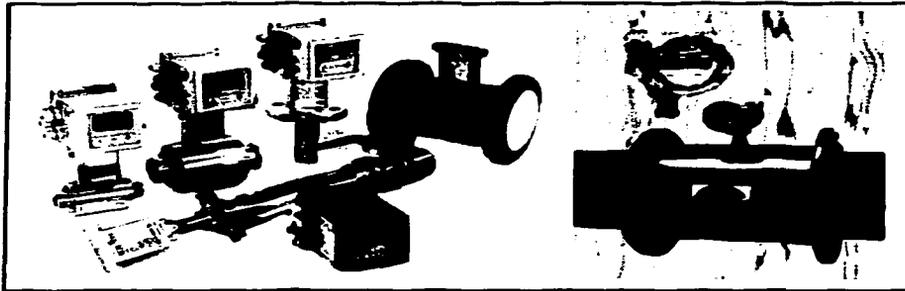


Fig. 3.3 - Ejemplos de medidores electromagnéticos

### 3.1.2 MEDICIÓN POR VÓRTICES

Los medidores de flujo basados en vórtices, utilizan el fenómeno de turbulencia que se presenta en los fluidos (líquidos, gases y vapores) al circular por una tubería que presenta una obstrucción no lineal a la dirección del fluido. Esto es un cuerpo robusto que se encuentra en el camino del fluido y que frena parte del fluido, de manera que se presente un diferencial de velocidades entre las capas del fluido propiciando la formación de un vórtice o remolino. Las capas exteriores o periféricas del fluido se ven imposibilitadas de seguir el camino del fluido interior, de manera que chocan las capas exteriores con las interiores formando "remolinos" o turbulencias. Los vórtices que se producen al chocar el fluido con el cuerpo restrictor, se forman con una frecuencia que es proporcional a la velocidad del fluido.

Existen muchos medidores de vórtices los cuales son empleados por los fabricantes de estos medidores, siendo los más destacados: diafragmas piezoeléctricos, lenguas oscilantes capacitivas o piezoeléctricas, sensores ultrasónicos, termistores y cuerpos restrictivos. Realmente las variaciones que existen entre fabricantes de estos elementos son los tipos de cuerpos restrictivos, los tipos de sensores, los lugares físicos de detección

o arreglo en la tubería y la electrónica empleada. Todos estos elementos son los que detectan los pulsos de presión (diferenciales) o la velocidad resultante cuando son generados los vórtices en el interior de las tuberías.

Igualmente que los medidores electromagnéticos, los medidores electrónicos de vórtices entregan una corriente normalizada para ser entendida por los controladores más comunes del mercado, esto es: la salida análoga de variaciones de 0-20 miliampers o de 4-20 mA, así como también pulsos para controladores digitales.

Los medidores que emplean el método de vórtices están principalmente diseñados para ser utilizados en la medición del flujo para fluidos no conductores, ya que para éstos no pueden ser utilizados los medidores electromagnéticos. Realmente el futuro de la medición de flujo para fluidos no conductivos va en el sentido del uso de los medidores por vórtices, ya que aumentan la precisión con respecto a los medidores de placa de orificio y a los medidores de diferencial de presión.

Los medidores basados en vórtices aunque son utilizados desde los años setenta, son realmente empleados desde hace pocos años, ya que habían de ser mejorados los materiales con los que se producían los elementos restrictores ya que éstos producían ruidos sobre la señal detectada, así como el mejorar los sensores de los medidores.

El estudio de los vórtices ha sido tocado por una gran cantidad de físicos, matemáticos y estudiosos en general de los fenómenos físicos. Por ejemplo, Theodor Von Karman pudo describir a los vórtices en una de sus particularidades mediante modelos matemáticos. Con sus estudios descubrió que hay una relación directa entre la distancia que existe entre los ejes de formación de los vórtices y la distancia entre la formación de un vórtice y el siguiente, como se observa en la figura 3.4.

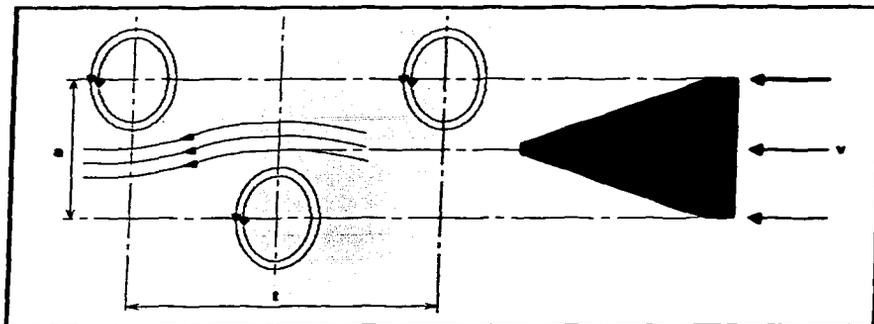


Fig. 3.4 - Formación del Vórtice Karman

Por ejemplo la relación directa está expresada en el caso de un cuerpo restrictor cilíndrico en la fórmula 3.4.

$$\frac{a}{l} = 0.281 \quad \text{Fórmula : 3.4}$$

El factor Karman es proporcionado por los fabricantes de los medidores de flujo con base en vórtices.

Otra persona que los estudió fue Strouhal, el cual lo hizo a finales del siglo XIX. Strouhal encontró que si dejaba un pequeño cable suelto dentro de la tubería y quedando éste dentro de la corriente del fluido, vibraba de manera proporcional a la velocidad del fluido, lo cual se puede notar por ejemplo al escuchar el correr del viento, que entre más sopla el viento, el tono del sonido se modifica y mientras se mantiene la velocidad del viento, el tono será el mismo, por lo que descubrió que podía determinar un factor que dependía del cable o cuerpo restrictor, de la velocidad del fluido y de la frecuencia de vibración del elemento restrictor.

El factor Strouhal se puede determinar mediante la fórmula 3.5:

$$St = \frac{f \cdot d}{V_o} \quad \text{Fórmula : 3.5}$$

De donde:

$St$  = Factor Strouhal [Adimensional]

$f$  = Frecuencia del Vórtice [Hertz]

$d$  = Diámetro del cuerpo restrictor [m]

$V_o$  = Velocidad del Fluido [m/s]

Igualmente que el factor Karman, el factor Strouhal es proporcionado por los fabricantes de medidores de flujo con base en vórtices.

La velocidad del flujo se incrementa dependiendo del diámetro del cuerpo que restringe al flujo del fluido, lo cual resulta claro de la fórmula 3.5, en la cual si crece el numerador (diámetro), entonces crece la velocidad del fluido. Digamos que el líquido al chocar con el cuerpo restrictor, se "adhiera" a él momentáneamente por lo que hay un rompimiento de las capas del fluido, aumentando su velocidad las capas que se encuentran alejadas del cuerpo restrictor y las que se encuentran pegadas al cuerpo toman un camino similar al de la forma del cuerpo restrictor por la descomposición del vector de velocidad que traían. La desviación de los vectores de velocidad llegan a un punto en el que se da un retroceso de fluido, provocando la formación del vórtice, como se muestra en la figura 3.5.

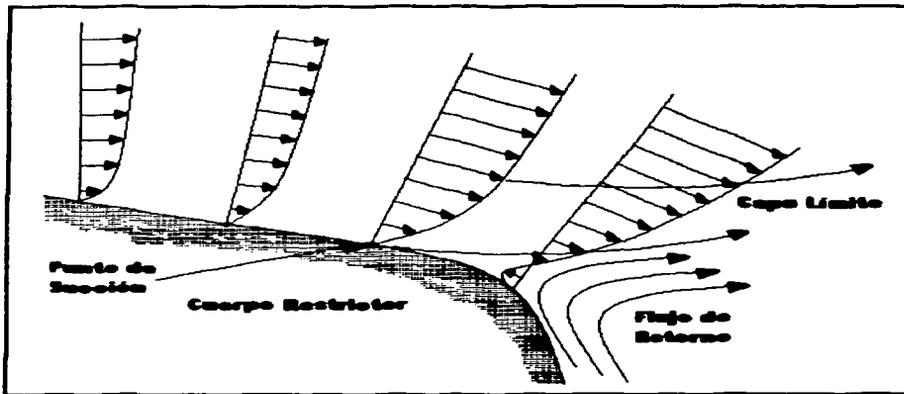


Fig. 3.5 - Generación vectorial de un vórtice

La frecuencia del vórtice no se ve afectada por los cambios de presión, temperatura o densidad del fluido, por lo que en un momento dado puede ser utilizado el mismo medidor de flujo con gases, vapores y líquidos.

Los cuerpos restrictores al flujo han sido cambiados de forma ya que se ha encontrado que los desempeños de unos con respecto a otros variaban en cuanto a la relación directa entre el número de Strouhal. Los primeros fueron de forma cilíndrica, pero éstos hacían fluctuar mucho la posición y frecuencia de los vórtices debido a las variaciones en velocidad del flujo. Después de este intento, se reemplazó el cuerpo por otro en forma de Delta, el cual tuvo un desempeño mucho mejor que el anterior, ya que se encontraba que era casi perfecta la linealidad entre la velocidad y el diámetro. Con éste, el borde del vórtice es claramente identificable. Para otros intentos, se hicieron pruebas con cuerpos de dos partes o rectangulares, los cuales no fueron muy precisos, ya que generaban distorsiones en la linealidad entre la velocidad y el diámetro, dependiendo de la densidad del fluido o de la presión. Por esa razón, se encontró que entre más sencillo y parecido a la delta, el medidor podía usar sensores y amplificadores más sencillos. La selección de los cuerpos restrictores también depende de los diámetros de las tuberías donde quieren ser utilizados con base en las especificaciones de cada fabricante.

Para seleccionar el medidor de flujo por vórtices, para un caso específico, se tienen tablas en las que se manifiesta la relación existente entre el número de Strouhal y el número de Reynolds, siendo ésta una relación que depende del tipo de cuerpo restrictor y el acabado del mismo.

El número de Reynolds es un índice adimensional que mide el desempeño del medidor, quedando definido como la relación existente entre las fuerzas inerciales en los líquidos y las fuerzas de arrastre. La cantidad de flujo y la gravedad específica son denominadas las fuerzas inerciales y el diámetro interior del tubo y la viscosidad son las fuerzas de arrastre. Esta relación queda expresada en la fórmula 3.6.

$$Re = \frac{\rho * d * v}{\mu}$$

Siendo :  $v = \frac{u}{\rho}$

$$Quedando : Re = \frac{v * d}{\nu} \quad \text{Fórmula : 3.6}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

De donde:

$Re$  = Número de Reynolds [Adimensional]

$\rho$  = Densidad del fluido [ $kg/m^3$ ].

$\mu$  = Viscosidad absoluta del fluido [ $kg./ms$ ].

$v$  = Velocidad del flujo [ $m/s$ ].

$d$  = Diámetro interior de la tubería [ $m$ ].

$\nu$  = Viscosidad cinemática [ $m^2/s$ ].

La relación existente entre ambas fuerzas determinan los flujos laminares o turbulentos. Las transiciones de flujo laminar a turbulento son importantes para los vórtices, ya que al colocar un cuerpo restrictor en el interior de un tubo o canal, se transforma el flujo laminar a un flujo turbulento propiciando la aparición de vórtices. El flujo laminar se considera cuando su número de Reynolds es menor a 2,000, pero se considera turbulento cuando sobrepasa los 3,000. Durante la transición del número de Reynolds de 2,000 a 3,000 se puede presentar cualquiera de los dos tipos de flujos.

Por otro lado, los sensores utilizados en los medidores de flujo por vórtices pueden variar, ya que dependiendo de los fabricantes se utilizan distintos tipos de sensores. Los normalmente utilizados son: los termistores, sensores de presión, sensores mecánicos y piezoeléctricos. Los termistores son sensores que detectan pequeñísimas variaciones en temperatura que hacen variar su resistividad. La formación de vórtices propicia cambios de presión sobre los cuerpos restrictores, los cuales a través de un pequeño diafragma, el cual contiene un aceite dieléctrico entre una membrana y un electrodo, que cambia la capacitancia para poder efectuar la medición. Algunos otros fabricantes lo hacen por variaciones de voltaje cuando un cristal piezoeléctrico es usado en conjunto con un electrodo. Cuando son utilizados sensores mecánicos, éstos emplean un balín interior que al moverse por el flujo y contraflujo producen una lectura por un campo magnético movable. Estos últimos no se utilizan tanto en la actualidad, ya que pueden dar lecturas erróneas por suciedad acumulada y desgastes.

El uso de los medidores de caudal en lodos y líquidos muy viscosos no es recomendado, ya que se presentan problemas de falta de formación de vórtices.

En la figura 3.6 se presentan ejemplos de medidores comerciales de flujo por vórtices.



Fig. 3.6 - Ejemplos de medidores por vórtices

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.1.3 MEDICIÓN POR DESPLAZAMIENTO POSITIVO

Los medidores del flujo denominados de Desplazamiento Positivo miden el flujo volumétrico de un líquido, vapor o gas, mediante la separación del flujo dentro de espacios en los que se conoce el volumen encerrado, durante una medida de tiempo determinada. Algunos de los que más se utilizan son: Engranajes rectos, Lóbulos, Pistones y Diafragmas. Normalmente están diseñados para ser utilizados en líquidos viscosos, donde el uso de un medidor sencillo y mecánico es necesario.

Los medidores de desplazamiento positivo que emplean pistones recíprocos pueden emplear una gran variedad de líquidos, pero estos fluidos deben estar muy limpios, ya que si contienen partículas duras suspendidas, pueden rayar y dañar la superficie de los pistones.

Los que utilizan engranes son de uso muy común, ya que al girar dos engranes rectos que se encuentran dentro de una carcasa, empujan una cantidad exacta de volumen que es el que queda atrapado entre los dientes de los engranes al estar rotando. También se entiende que al estar deslizándose las superficies de los dientes de los engranes, se presenta fricción entre las caras incrementando el consumo de energía por la disipación de la fricción en forma de calor. Además si el fluido es abrasivo, las caras de los engranes se pueden desgastar.

Por otro lado, los medidores de lóbulos funcionan de forma similar a los de engranes, pero en vez de engranar con dientes, estos deslizan sus superficies propiciando un sello hermético para empujar al fluido a través de la carcasa. Durante todo el paso del fluido a través de los lóbulos, se mantiene un contacto directo con deslizamiento de sus superficies

mientras éstos giran para dejar pasar solamente una cantidad de fluido específico. Igualmente al contabilizar las revoluciones de las flechas de sujeción de los lóbulos se puede saber el volumen que atravesó al cuerpo del medidor. Para este caso se sugiere que el fluido a ser empujado a través del medidor sirva como lubricante entre estas dos superficies deslizantes, ya que de no ser así, el desgaste entre superficies es muy alto.

Los medidores de caudal por desplazamiento positivo son muy conocidos por el uso en medidores de consumo de agua o de gas.

Las ventajas de utilizar este tipo de medidores son principalmente:

- Precisión en mediciones que van de buenas a excelentes.
- No se ven afectados por las viscosidades o densidades de los fluidos utilizados.

Las limitaciones o desventajas que presentan los medidores de desplazamiento positivo son:

- Vida útil más corta que otros medidores, debido a que se efectúa la medición por medio de superficies deslizantes, las cuales se ven desgastadas por la fricción mecánica.
- Se puede bloquear la tubería si existe un daño dentro del medidor
- Costo elevado del medidor.
- Costo igualmente elevado de mantenimiento.

Los medidores de desplazamiento positivo no son recomendados para:

- Ser utilizados con materiales sucios, con tierra o que sean materiales abrasivos, ya que desgastan a las superficies que se encuentran en contacto dentro del medidor de flujo.
- Altas temperaturas de los fluidos debido a la fricción que se presenta.
- Se pueden tener vibraciones indeseables.
- Ser usados en aplicaciones sencillas, ya que normalmente los medidores de desplazamiento positivo son caros, comparativamente hablando con un medidor electromagnético.
- Aplicaciones en las que se requiera tener ahorros de energía, ya que en estos medidores se presenta consumo mayor que los demás tipos de medidores, debido a que la energía es disipada debido a la fricción en calor.
- Ser usados en líneas o conductos de alto flujo, debido a sus restricciones físicas.

En la figura 3.7 se presentan ejemplos de medidores comerciales de flujo por desplazamiento positivo.



Fig. 3.7 - Ejemplos de medidores por desplazamiento positivo

### 3.1.4 MEDICIÓN POR ULTRASONIDO

Los medidores de flujo ultrasónicos han atraído la atención de la industria del gas natural durante la última década. A la fecha, se han desarrollado equipos comerciales que usan técnicas ya patentadas.

Las mediciones acústicas de flujo son ampliamente conocidas. Éstas determinan la velocidad promedio del líquido fluyente a partir de la diferencia en tiempo de tránsito de los pulsos acústicos transmitidos en las rutas de flujo ascendente y flujo descendente, respectivamente. Estos pulsos acústicos se transmiten a lo largo de la ruta de desplazamiento del fluido y una medición de la velocidad se determina a partir de los tiempos de tránsito medidos. El líquido puede ser gas o líquido.

Los tiempos de tránsito dependen de la velocidad media, el perfil del flujo y la estructura de turbulencia del arroyo que está fluyendo. La precisión de la velocidad de medida depende de la longitud de la ruta, de la configuración y posición radial de la ruta acústica, de la forma del pulso acústico transmitido, de la sincronización electrónica y del desempeño de movimiento de compuertas y por último de los cálculos involucrados en la reducción de los parámetros medidos para obtener la velocidad media.

Se pueden montar los sensores acústicos en una posición no agresiva. Es decir, un montaje o ensamble agresivo, invade la estructura de contención del canal por medio de

una abertura. Un montaje invasor no transmite pulsos acústicos a través de la estructura de contención, a la que en ocasiones se le llama de sensores "húmedos". Un montaje no invasor transmite pulsos acústicos a través de toda la estructura de contención del canal o de parte de ésta, y en este caso se le denomina sensor "no húmedo".

Este montaje invasor se clasifica además como "de intrusión" o "no-intrusión". El término "intrusión" se refiere a que una parte, o todo el sensor incursiona en el medio fluyente, mientras que el apelativo "no-intrusión" define el sensor que está montado de manera que no incursiona en este flujo.

Las rutas acústicas se pueden configurar en una geometría reflectante, no reflectante o híbrida. Una geometría reflectante se configura de tal forma que refleje una o más veces la estructura de contención o un cuerpo reflectante instalado dentro del canal.

Una ruta no reflectante se configura geométricamente para no reflejar la estructura de contención, ni el cuerpo reflectante dentro del canal.

El diseño híbrido emplea cualquier combinación de ambas rutas, reflectante y no reflectante y/o configuraciones de intrusión y de no-intrusión. El número de rutas y su colocación en el canal, varía de acuerdo a los diseños científicos y comerciales. Ver ejemplo en la figura 3.8.

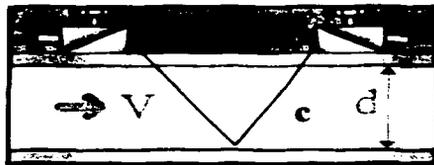


Fig. 3.8 Ejemplo de colocación de sensores en el mismo lado de la tubería para la medición del fluido del líquido

En la figura 3.8 la  $c$  son los pulsos acústicos,  $v$  es la velocidad de fluido y  $d$  el diámetro de la tubería.

#### Beneficios de Medidores de flujo de Ultrasonido:

- Para uso en tuberías de largos diámetros.

- No hay pérdida de presión.
- Son de larga vida útil.
- Pueden ser fácilmente instalados en tuberías.
- Son de respuesta rápida.
- No dependen de propiedades físicas (fluidos homogéneos).

#### **Ejemplos de aplicaciones de Medidores de flujo de Ultrasonido:**

- Para líquidos altamente contaminados.
- Para aguas residuales.
- En altas temperaturas.
- En fluidos con turbulencias.
- Medición de químicos orgánicos e inorgánicos.
- Medición de leche, cerveza etc.

### **3.1.5 MEDICIÓN POR CANAL ABIERTO**

El método común para medir flujos a través de un canal abierto es mediante la medición de la altura de un líquido mientras éste pasa a través de una obstrucción (una acequia o presa) en el canal. La velocidad del agua en un río o en un arroyo también se puede medir utilizando medidores de velocidad en sitio, como por ejemplo, de ultrasonido Doppler o de turbina. Hay muchos tipos de medidores de flujo de canal abierto.

El uso efectivo de líquidos para diversos procesos industriales requiere que los índices y volúmenes de flujo se midan y expresen en forma cuantitativa. La medición de índices de flujo en canales abiertos resulta difícil debido a las dimensiones de canales no uniformes y a las diferencias de velocidades a lo largo del canal. Las presas permiten que el agua se conduzca por estructuras de dimensiones conocidas, permitiendo así que los índices de flujo se puedan medir como una función de profundidad del flujo a través de la estructura. Por lo tanto, uno de los métodos más simples y precisos para medir el flujo del agua en canales abiertos es el método de la presa.

En este apartado se presenta este método por su relación con la medición de niveles de agua en los procesos industriales. En su forma más simple, una presa consiste en una compuerta de madera, metal o concreto con una abertura de dimensiones fijas en su borde superior. A esta abertura se le llama esclusa; es el borde inferior de la cresta de la presa; Y

la profundidad o altura del flujo sobre la cresta (medida a una distancia específica corriente arriba desde la compuerta) se llama cabeza. La capa de agua de sobreflujo se conoce con el nombre de *napa*, lámina vertiente o capa de agua.

Las presas nos brindan el método más sencillo y más exacto para medir índices de flujo en canales abiertos.

Existen dos tipos de presas: presas de crestas altas y presas de crestas amplias. En este documento únicamente se describen las presas de crestas altas, ya que por lo regular son las que se usan para la medición de aguas de tratamiento. Los bordes altos de las crestas causan que el agua se separe de la cresta y por eso se pueden efectuar mediciones muy precisas. Las presas de crestas amplias normalmente se incorporan a estructuras hidráulicas de diversos tipos y aunque en ocasiones se usan para medir el flujo de agua, ésta resulta una función secundaria. En la Figura 3.9 se ilustran los componentes de las presas de crestas altas.

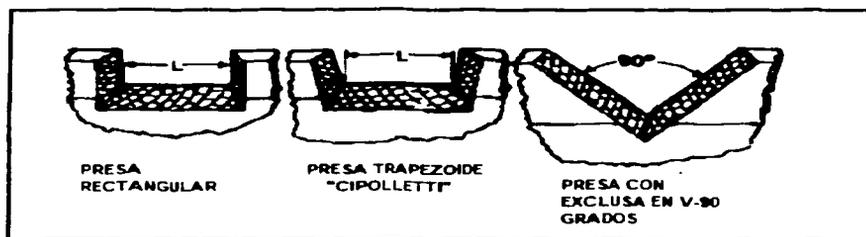


Fig. 3.9 - Tipos de presas de crestas altas

La presa seleccionada será aquella que se adapte mejor a las circunstancias y condiciones en los sitios de medición. Normalmente, el índice de flujo esperado se puede estimar en forma aproximada con anticipación y en base a ello se puede seleccionar tanto el tipo de presa, como sus dimensiones. Se deben de considerar los siguientes factores cuando se selecciona un tipo específico de presa para determinada aplicación.

Las mediciones que se realicen por medio de presas resultan precisas sólo cuando las presas están diseñadas correctamente y donde la cabeza se puede leer en algún punto a distancia, corriente arriba desde la cresta, de manera que la lectura no resulte afectada por la curva descendiente del agua.

### 3.1.6 MEDICIÓN POR PLACA DE ORIFICIO

El medidor de placa de Orificio mide un flujo a través de las diferencias en la presión desde el extremo de corriente arriba, hacia el extremo de corriente abajo en un tubo parcialmente obstruido. La placa ofrece una obstrucción que angosta el tubo y fuerza al fluido a contraerse. Una celda o dispositivo de presión permite la comparación de la presión en el extremo sin obstrucción y en el extremo en contracción.

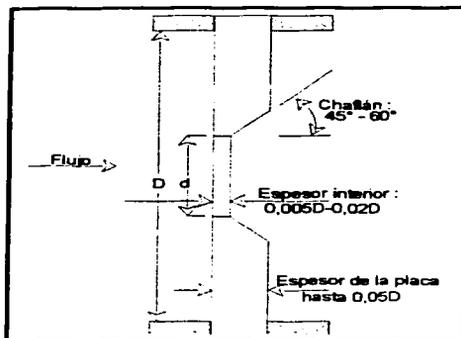


Fig. 3.10 Esquema de un medidor de placa de orificio.

Entre mayor sea el flujo, más grande es la diferencia en la presión, a medida que el fluido se contrae atravesando la placa (véase la figura 3.10). Existen diferentes tipos de placa de orificio, incluyendo, concéntricas, excéntricas y de segmentos, cada una de éstas presentan distintas formas y ubicaciones para medición de distintos procesos. Las placas de orificio son de uso común en muchas instalaciones.

Los medidores de placa de orificio tienen una amplísima gama de tamaños para cumplir con un número casi infinito de condiciones de aplicación. Este dispositivo se puede hacer de una gran variedad de materiales para satisfacer costos y requerimientos de aplicación. Su uso principal es para gases, en donde éste se utiliza como elemento principal de medición.

### 3.1.7 MEDICIÓN POR TURBINAS

Cuando se mueve un líquido a través de un tubo, éste actúa en las paletas de la turbina para hacerla girar. La velocidad de rotación de la turbina es proporcional a la velocidad del flujo.

La construcción básica del medidor de flujo de turbina incorpora un rotor de turbina con álabes instalado en un tubo de flujo. El rotor está suspendido en forma axial en la dirección del flujo a lo largo del tubo. El flujómetro de turbina es un transductor que detecta el momento del flujo. El rotor con álabes gira sobre su eje en proporción al índice del flujo del líquido a través del tubo.

A medida que el producto líquido golpea el borde frontal de los álabes del rotor, se produce un área de baja presión entre el cono de corriente ascendente y el centro del rotor. Las paletas del rotor de la turbina tienden a viajar hacia el área de baja presión como resultado del diferencial de presión a través de las paletas. El diferencial de presión (o baja de presión) constituye la energía gastada en producir el movimiento del rotor. La tendencia inicial del rotor es viajar hacia la corriente descendente en forma de empuje axial. Pero como el rotor está restringido de movimientos excesivos hacia abajo, el único movimiento resultante es la rotación.

El líquido que fluye a través del medidor causa una velocidad angular de los álabes del rotor de la turbina, que es directamente proporcional a la velocidad lineal del líquido. El grado de la velocidad angular o el número de revoluciones por minuto del rotor de la turbina queda determinado por el ángulo de los álabes del rotor hacia el líquido fluyente.

Se generan señales eléctricas al utilizar el principio de la inducción. Una bobina captadora se instala en el exterior del tubo de flujo, justo a un lado del perímetro del rotor de la turbina. La fuente magnética del campo de flujo en este tipo de salida, es el rotor en sí o los pequeños imanes que se encuentra instalados en el rotor. En el caso del rotor, el material de construcción debe ser níquel o algún otro material que se pueda magnetizar fácilmente. Véase la figura 3.11.

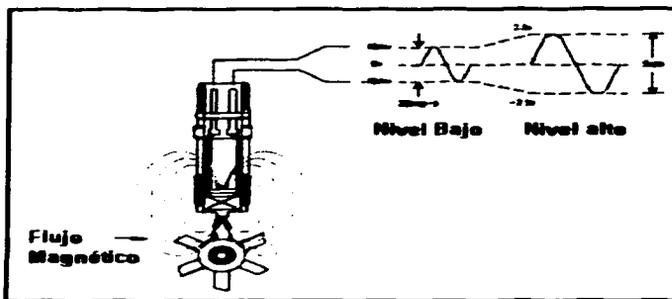


Fig. 3.11 Medición de la velocidad de flujo utilizando una bobina

### 3.1.8 MEDICIÓN DE FLUJO POR PRINCIPIO LÁSER-DOPPLER

Después del descubrimiento del rayo láser el principio fue ampliamente utilizado para propósitos militares e industriales principalmente. Actualmente la tecnología láser es usada en una variedad de aplicaciones. El rayo láser posee amplitud de ondas constantes lo cual permite su uso para la medición de fluidos. Con ayuda de un fino rayo láser, los vectores de velocidad pueden ser medidos con gran precisión. Con el uso de una computadora se puede calcular la velocidad promedio a través del diámetro de una tubería.

Debido a la relativa velocidad baja de los fluidos, se utiliza una barrera de luz con capacidad de filtración producida al combinar dos rayos láser de la misma frecuencia. Una partícula que cruza este haz de luz transmite un haz de luz hacia un receptor (generalmente un foto-amplificador) a una frecuencia que es proporcional a la velocidad y distancia, en relación al nivel de la barrera de luz. (Véase la figura 3.14)

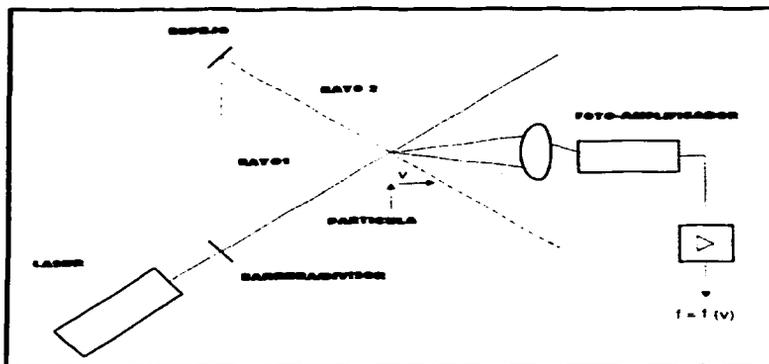


Fig. 3.14 - Principio medidor de flujo Láser-Doppler

El desempeño del medidor de flujo Doppler depende mucho en propiedades tales como la conductividad acústica del líquido, densidad de partículas y perfil de flujo. En la misma forma, la no-uniformidad de la distribución de partículas en las secciones transversales del tubo resulta en una velocidad promedio estimada incorrectamente. Por lo tanto, la precisión del medidor es sensible a las diferencias de perfil de velocidad y a la distribución de reflectores acústicos en la sección de medición. A diferencia de otros medidores de flujo acústicos, los medidores Doppler resultan afectados por cambios en densidad y temperatura y estos problemas hacen a los medidores de flujo Doppler poco recomendables para mediciones muy precisas en algunas aplicaciones. Los medidores Doppler desempeñan un papel muy importante en áreas donde otros medidores no funcionan, como en: mezclas de líquidos con gases o líquidos con cantidades pequeñas o grandes de sólidos suspendidos, en nuestro caso específico para medición de aguas residuales.

#### Ventajas de los medidores de flujo Láser-Doppler

- Los vectores de velocidad pueden ser medidos
- Gran precisión en la medición
- No necesitan calibración

### Desventajas medidores de flujo Láser-Doppler

- El fluido debe ser transparente
- Solo se puede hacer medición de velocidad
- Equipo de alto costo
- Instalación de alto costo

### 3.1.9 MEDICIÓN DE FLUJO DE OBJETIVO PARA LÍQUIDOS, GASES Y VAPORES

Los fluidos medibles para este tipo de medidores de flujo varían desde líquidos altamente sedimentados o calientes, y alquitranados o hidrocarburos, soluciones ácidas y cáusticas, aire, gas natural, amoníaco, cloro y otros gases químicos, así como vapor supersaturado.

El flujómetro de objetivo es en realidad una placa de orificio con dirección "de adentro hacia afuera". La Figura 3.15 muestra el método de medición de flujo de objetivo, en el cual existe un diferencial de presión entre la superficie delantera y trasera del disco circular producido por la corriente de flujo que fluye de derecha a izquierda. La fuerza de este arrastre de presión se transmite a través de un brazo volado hacia un tubo de flexión, de diseño exclusivo, que permite a los elementos de lectura de tensión tener un montaje externo al medio del fluido. El puente de medición de tensión de cuatro brazos activos ofrece resolución infinita, alta linealidad, excelente sensibilidad, un amplio rango de compensación de temperatura. Resulta obvio que el flujo puede viajar en cualquier dirección. Esta característica de flujo bi-direccional es de importancia particular en diversas aplicaciones de gas y vapor.

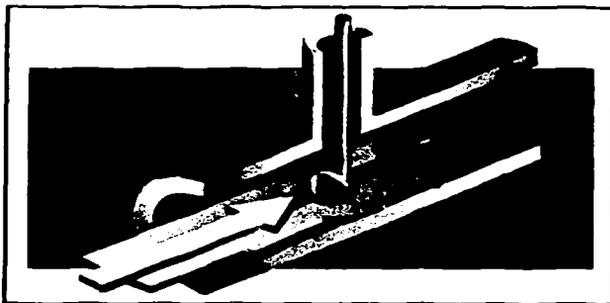


Fig. 3.15 - Medidor de flujo de objetivo

A diferencia de una placa de orificio, que requiere una colocación separada de los puertos de presión que es difícil de ubicar en la posición precisamente correcta, el diferencial de presión es detectado de manera electrónica y directa por el desequilibrio de fuerza a través del disco. En este sentido, el flujómetro puede también estar conectado a una "báscula" dinámica que responde a la fuerza producida por la dinámica del flujo.

La fuerza dinámica está relacionada proporcionalmente al producto de la cabeza de velocidad, la densidad del fluido ( $\rho$ ), el coeficiente de arrastre del disco y el área de su superficie.

### **3.2 MEDICIÓN DE FLUJO MÁSIKO**

#### **3.2.1 MEDIDORES DE FLUJO POR ACELERACIÓN DE CORIOLIS**

Los medidores de flujo Coriolis son instrumentos que – utilizando el principio de Coriolis – miden directamente el índice de flujo de masa de un proceso. La fuerza Coriolis es el fenómeno que causa que los objetos parezcan doblarse a medida que se mueven a través de la superficie de la tierra.

El diseño de estos equipos está basado en dos tubos colocados paralelamente que vibran en la misma frecuencia de resonancia. Sensores infrarrojos son colocados en los extremos de entrada y salida de los tubos en oscilación. Estos sensores miden el movimiento provocado por el flujo a la entrada y salida de los tubos alimentando las señales a un circuito que mide la diferencia en tiempo de las oscilaciones entre ambos. Esta diferencia es proporcional al flujo másico. Generalmente este tipo de medidores es de alta precisión.

El flujómetro Coriolis introduce, artificialmente, una aceleración Coriolis positiva y negativa al proceso. Los tubos son sometidos a vibración múltiple de su frecuencia resonante natural. Transductores miniatura de velocidad compuestos de bobina e imán son montados en uno de los tubos (véase la figura 3.12). Cuando no hay presencia de fluido los tubos vibran y la generación de onda senoidal de cada transductor de velocidad está en fase. En presencia del fluido, los tubos comienzan a girar debido a la aceleración Coriolis inducida por la masa en movimiento. Esto provoca que las ondas senoidales cambien (ya sea que se adelanten o atrasen, dependiendo de la dirección del flujo) y se realice la medición.

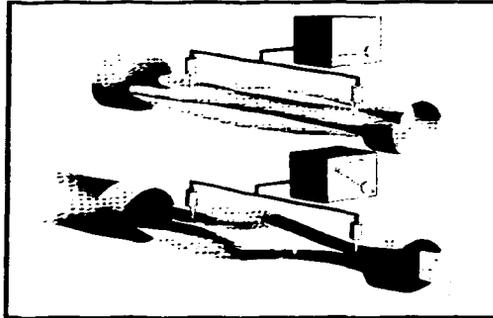


Fig. 3.12 - Tubos empleados para medición Coriolis

Un beneficio adicional de los medidores de flujo Coriolis es su capacidad para realizar mediciones múltiples. Además de medir directamente el flujo de masa, los medidores de flujo Coriolis también miden la densidad del proceso mediante monitoreo del periodo de vibración de tubo, caracterizándola como una densidad. El proceso avanzado de señales digitales permite a los transmisores del flujómetro Coriolis calcular las concentraciones de mezcla de dos componentes y los volúmenes netos.

#### **Beneficios de Medidores de flujo de Coriolis**

- Presentan más alta precisión de medición y alimentación a través de medición directa de flujo de masa.
- Requisitos de instalación mínima debido a su diseño compacto y de implementación en línea.
- Presentan bajos costos de mantenimiento.
- Principio de medición sin par, a través de veloz adquisición de valor de medición.
- Tolerante a influencias externas.
- No daña el ambiente.

Se muestra un ejemplo de medidores de flujo de Coriolis en la figura 3.13.



Fig. 3.13 - Ejemplo de flujómetro de Coriolis

**Ejemplos de aplicaciones de Flujómetro de Coriolis:**

- Alimentación en fábricas cementeras.
- Alimentación de hornos en la industria cementera.
- Fabricación de detergentes.
- Fabricación de fertilizantes.
- Desulfuración de gas de combustión en centrales generadoras de energía eléctrica.
- Alimentación de aditivos en procesos metalúrgicos.
- Mezcla y dosificación de sólidos volumétricos.
- Carga de camiones (disponible la opción *legal para comercio*).

## **CAPÍTULO 4**

### **DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA**

#### **4.1 ANTECEDENTES**

En este capítulo se describe la metodología propuesta para seleccionar de manera ordenada y efectiva un medidor de nivel o de flujo para las aplicaciones en las que se requieren estos instrumentos, considerando; el requerimiento de medición, las propiedades físicas del producto o material utilizado, las restricciones del proceso, las limitaciones o restricciones de los medidores y los costos añadidos a la utilización de cada tipo de medidor. Esta metodología se describe paso a paso para hacer fácil su seguimiento y por lo tanto, hacer de manera sencilla la selección de cada tipo de medidor de nivel o de flujo.

El poder seleccionar el correcto instrumento de medición, en función de diferentes condiciones y/o alternativas, permitirá reducir la brecha existente hoy en día entre proveedores y clientes, debido a que en ocasiones el cliente se ve limitado a comprar lo que el proveedor le quiere vender y no a lo que le es de mayor utilidad.

#### **4.2 METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE MEDIDORES DE NIVEL Y DE FLUJO**

Para la selección de instrumentos de medición de nivel y de flujo son varios los factores que se deben considerar. Cada producto tiene propiedades físicas que lo distinguen de otros productos, pero no sólo se deben considerar las propiedades del producto que se maneja, sino también las condiciones y restricciones del proceso. Ya que, si bien, las propiedades físicas del producto a medir influyen en gran parte en la decisión del instrumento a utilizar, hay características de cada proceso, tales como presión, temperatura, entre otras, que influyen en el proceso de medición, así como las restricciones existentes en el proceso, tales como el requerimiento de acabado sanitario, si el producto puede estar en contacto con el instrumento, etc.

La metodología propuesta se describe en los siguientes puntos:

#### **4.2.1 DEFINIR EL ESTADO FÍSICO DEL PRODUCTO QUE SE DESEA MEDIR**

El primer paso para la selección de instrumentos de medición de nivel y de flujo es el de definir el estado físico del producto que se va a manejar, entendiéndose que se tiene que especificar si el producto se encuentra en estado:

1. Líquido.
2. Sólido.
3. Gas.
4. Combinación de los anteriores.

#### **4.2.2 DEFINIR FUNCIÓN A REALIZAR POR EL INSTRUMENTO**

Como segundo paso, se debe especificar que función específica debe realizar el instrumento, en cuanto a ser un medidor de nivel o de flujo, así como la determinación de la necesidad de utilizar el medidor para detectar o para medir continuamente el nivel o flujo. Para esto se emplean las tablas 4.1 y 4.2, presentadas en el apartado 4.2.6.

##### **EN NIVEL:**

- Detección de nivel.
- Medición continua de nivel.

##### **EN FLUJO:**

- Detección de flujo.
- Medición Continua de flujo.

#### **4.2.3 PROPIEDADES FÍSICAS DEL PRODUCTO**

El tercer paso a seguir para la correcta selección de instrumentos de medición consta de las propiedades físicas del producto que se está manejando; Se debe conocer y especificar las propiedades físicas más relevantes del producto. Dentro de estas propiedades a definir están: densidad, viscosidad, conductividad, constante dieléctrica, etc.

También es importante considerar otras características particulares del producto, tales como si: el producto es un producto corrosivo, genera espuma, tiene tendencia a formación de depósitos o sedimentos, o cualquier otra característica particular que el producto tenga.

#### **4.2.4 CONDICIONES DEL PROCESO**

Una vez definidas las propiedades y características del producto (punto 4.2.3), el cuarto paso consta en especificar las condiciones generales en las que se lleva a cabo el proceso, tales como presión, temperatura, humedad del ambiente y materiales de tuberías y tanques utilizados en el proceso.

#### **4.2.5 RESTRICCIONES DEL PROCESO**

No basta con conocer las propiedades del producto y las condiciones generales en las que se lleva a cabo el proceso, sino que también es necesario mencionar qué restricciones se encontrarán en los procesos que puedan dificultar la medición de nivel o de flujo, siendo éste el quinto paso de la metodología. Las restricciones a contemplar pueden ser las siguientes: si el proceso de medición es invasivo, si el instrumento debe tener acabado sanitario, el nivel de precisión que se requiere en la medición y el costo del equipo entre otros.

Se entiende como Acabado Sanitario dentro de la industria alimenticia y de elaboración de bebidas al requisito de que los componentes, accesorios e instrumentos que están en contacto con el producto tengan un acabado tal que evite la contaminación externa e interna del proceso, permitiendo que el producto terminado pueda ser consumido por el ser humano de acuerdo con las normas aplicables.

Para que un accesorio o un instrumento tenga acabado sanitario se requiere que:

- a) No transfiera sabor u olor al producto.
- b) No absorba sabor u olor del producto.
- c) Debe ser susceptible de ser limpiado mediante el sistema CIP (*Clean in Place*) usado en planta.
- d) No debe ser dañado por corrosión.
- e) No debe presentar oclusiones o rugosidades que permitan el crecimiento de microorganismos.
- f) No debe presentar "áreas muertas" donde no alcancen a llegar las soluciones de limpieza de manera eficiente, especialmente en los puntos de conexión.

- g) Los sellos o empaques utilizados deben ser fácilmente reemplazables, y el área de los empaques en contacto con el producto debe ser la mínima posible.
- h) Se debe evitar que superficies con roscas o cuerdas estén en contacto con el producto.
- i) El diseño debe favorecer el flujo del producto (no restricciones).
- j) Deben ser libres de fugas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### 4.2.6 APLICACIÓN DE LAS TABLAS DE SELECCIÓN DE INSTRUMENTOS

Una vez que se tiene la información mencionada en los párrafos anteriores, se hace una evaluación de los principios de medición disponibles para la medición de nivel y de flujo. Esta evaluación permite preseleccionar los principios de medición adecuados para el caso propuesto de la industria de bebidas.

Las tablas 4.1 a 4.5 son las herramientas que se utilizarán en esta metodología para llegar a la determinación del medidor a aplicar en cada punto del proceso.

La tabla 4.1 contiene los elementos para elegir el tipo de principios de detección / medición de nivel a emplear, en base a las propiedades físicas o condiciones clave, en cada parte del proceso.

Principio de Detección / Medición	Propiedad física o Condición clave	Detección	Medición Continua
Visual	Limpieza de <del>minúscula</del> , sin partículas granulares o grandes ni polvos.	Si	Si
Presión	Densidad constante, sin partículas granulares o grandes ni polvos.	Si	Si
Ultrasonido	Medio donde viaja el sonido (no invasivo) y sin formación de espuma.	Si	Si
Conductivo	Líquidos no corrosivos y sin partículas granulares o grandes.	Si	No
Capacitivo	Constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ ) constante / baja viscosidad y sin partículas grandes.	Si	Si
Vibratorio	Líquidos no corrosivos, con densidad entre 30 g/l y 0.5 g/cm <sup>3</sup> , sin partículas granulares o grandes ni polvos.	Si	No
Microondas	Baja viscosidad y no invasivo.	Si	No
Radiación Gamma	No invasivo y para condiciones extremas.	Si	Si
Flotador	Alta precisión, líquidos no corrosivos, sin partículas granulares o grandes ni polvos.	Si	Si
Plomada	Sólidos y líquidos homogéneos, no corrosivos ni presión mayor a 10 bar.	Si	Si

Tabla 4.1 - Referencia rápida para selección de principios de detección / medición de nivel

La tabla 4.2 contiene los elementos para elegir el tipo de principio de medición / detección de flujo a emplear, en base a las propiedades físicas o condiciones clave, en cada parte del proceso.

Principio de Medición	Propiedad física o Condición clave		Detección	Medición Continua
	LÍQUIDOS	GASES		
Desplazamiento Positivo	Ligeramente contaminados y no abrasivos	Ligeramente contaminados y no abrasivos	No	Si
Turbinas	Líquidos o gases sin contaminantes y no abrasivos	Gases con densidad > 1 kg/m <sup>3</sup>	No	Si
Ultrasónico	Líquidos limpios para detección	No aplica	Si	Si
Electromagnético	Líquidos Conductivos	No aplica	No	Si
Corolis	Medición Flujo Másico	No aplica	No	Si
Vórtice	Líquidos con viscosidad menor a 10 cSt. No contaminados. Únicamente para tuberías de diámetro menor a 500 mm.	Densidad > 1 kg/m <sup>3</sup> . Únicamente para tuberías de diámetro entre 25 y 500 mm y gases de alta humedad	No	Si
Presión Diferencial	Densidad constante	Densidad constante	Si	Si

Tabla 4.2 - Referencia rápida para selección de principios de detección / medición de flujo

En la tabla 4.3 se presentan los principios físicos de medición de nivel, relacionados con su comportamiento con las diferentes propiedades físicas de los productos, así como con las condiciones y las restricciones del proceso. Mediante la aplicación de dicha tabla se pueden observar las fortalezas y debilidades de cada principio de medición según el producto y sus condiciones y/o restricciones en el proceso.

Principio de medición	Presión		Temperatura		Viscosidad		Densidad		Conductividad térmica		Conductividad eléctrica	
	Superficie	Interior	Superficie	Interior	Superficie	Interior	Superficie	Interior	Superficie	Interior	Superficie	Interior
Principio de medición	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Presión entre 0.2 bar y 10 bar	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Presión superior a 10 bar	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Temperatura entre 0°C y 100°C	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Temperatura entre 100°C y 150°C	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Temperatura superior a 150°C	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Viscosidad superior a 100 mPa·s	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Viscosidad inferior a 100 mPa·s	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Densidad superior a 1000 kg/m³	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Densidad inferior a 1000 kg/m³	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Conductividad térmica superior a 10 W/m·K	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Conductividad térmica inferior a 10 W/m·K	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Conductividad eléctrica superior a 10 S/m	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Conductividad eléctrica inferior a 10 S/m	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L

■ = Recomendado      L = Limitado      N = No recomendado

Tabla 4.3 - Principios de medición de nivel vs. condiciones del proceso y propiedades físicas

De manera similar, en la tabla 4.4 se presentan los principios físicos de medición de flujo, relacionados con su comportamiento con las diferentes propiedades físicas de los productos, así como con las condiciones y las restricciones del proceso. Mediante la aplicación de dicha tabla se pueden observar las fortalezas y debilidades de cada principio de medición según el producto, las condiciones y restricciones del proceso.



metodología de selección donde intervienen otros factores propios del instrumento para llevar a cabo la correcta determinación del tipo de medidor. Estos factores son:

- Exactitud de los instrumentos de medición considerados.
- Costo relativo de los instrumentos considerados.
- Factibilidad de encontrar el instrumento en el mercado.

En la tabla 4.5 se muestra una comparación relativa entre varios sistemas de medición de nivel; mientras que en la tabla 4.6 se muestra lo referente a la medición de flujo.

Parámetro	Medidor de Presión	Medidor de Ultrasonido	Medidor de Corriente	Medidor de Capilar	Medidor de Vibración	Medidor de Nivelación	Medidor de Nivelación Geométrica	Medidor de Nivelación por Estación	Medidor de Flujo
Exactitud	± 0.1%	± 1.0%	0.5 - 1%	1 - 2%	± 0.1%	3 - 10 mm	2 - 5%	± 15% / m	± 1.5%
Costo	\$\$\$	\$\$	\$	\$\$	\$\$	\$\$\$	\$\$\$\$	\$\$\$	\$\$\$
	Acabado Sanitario	Acabado No Sanitario							

Tabla 4.5 - Comparación entre medidores de nivel

Parámetro	Medidor de Flujo Magnético	Medidor de Flujo de Masa	Medidor de Flujo de Velocidad	Tipos de Restricción (Pantallas, Orificios)	Flujo de Desplazamiento Positivo	Medidor de Flujo de Turbina	Medidor de Flujo Ultrasonido
Exactitud	± 0.2 - 1%	0.2 - 0.3	± 1% arriba Re = 20,000	± 0.5 - 1%	± 0.2 - 0.5 %	± 0.2 - 1%	± 1 - 2%
Diámetro	2.5 - 3000 mm	3 - 150 mm	15 - 300 mm	25 - 2000 mm	3 - 500 mm	5 - 500 mm	6 - 3000 mm
Costo	\$\$	\$\$\$\$\$	\$	\$\$\$	\$\$\$\$	\$\$\$\$	\$\$\$
	Acabado Sanitario	Acabado No Sanitario					

Tabla 4.6 - Comparación entre medidores de flujo

Estos tres parámetros son los últimos factores a considerar cuando se tiene más de un principio de medición posible de utilizar en la medición de nivel o de flujo. Estos factores proporcionan información para hacer una adecuada inversión en la instrumentación de procesos, permitiendo así reducir la brecha que pueda existir cuando un proveedor quiera vender siempre el instrumento más caro o el de mayor uso (ya sea estándar o con mayor inventario). De esta manera, el cliente podrá exigir realmente el instrumento que más satisfaga sus necesidades en cuanto a cuestiones técnicas como en cuestiones económicas.

En los formatos 4.1 y 4.2 se muestran dos cuestionarios que sirven para obtener la información importante a considerar al momento de seguir esta metodología. Con estos formatos se tendrá a mano la información necesaria para seguir la metodología descrita dentro del presente capítulo.

Con el cuestionario 4.1 se obtiene la información referente a las condiciones donde se desea colocar un medidor de nivel, y en el cuestionario 4.2 se llena lo relativo a las condiciones de operación referente a un medidor de flujo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# Cuestionario

Empresa: \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_\_

**Producto con el que se trabaja y sus condiciones de operación**

Temperatura (°C)	Mínima	
	Máxima	
Presión (kg/m <sup>2</sup> )	Mínima	
	Máxima	
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )		
Viscosidad (cS)		
Conductividad		
Espumoso		
Corrosivo		
Constante dieléctrica		

**Acción requerida del instrumento de medición**

Detección de Nivel	
Alto	
Bajo	
Medición Continua	

**Especificaciones del Tanque**

¿Es un tanque existente o es un tanque nuevo?

**Especificación de los Brackets para la instalación del instrumento**

**Características del Medio**

¿El medidor está en contacto con el producto? \_\_\_\_\_

¿Se requiere que el instrumento de medición tenga acabado sanitario? S \_\_\_\_\_ NO \_\_\_\_\_

¿Qué producto maneja? \_\_\_\_\_

**Control**

¿Qué señales requiere obtener del instrumento de medición?

**Compatibilidad con el resto de los instrumentos**

Formato 4.1 - Cuestionario para selección de medidores de nivel

# Cuestionario

Empresa: \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_\_

Formato 4.2 - Cuestionario para selección de medidores de flujo

**Producto con el que se trabaja y sus condiciones de operación**

Producto:

Flujo (m <sup>3</sup> /hr)	Mínima	
	Máxima	
Temperatura (°C)	Mínima	
	Máxima	
Durante el CIP		
Presión (kg/m <sup>2</sup> )	Mínima	
	Máxima	
Caida de presión permitida		
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )		
Viscosidad (cS)		
Conductividad		
Espumoso		
Corrosivo		
Constante dieléctrica		
Abrasión		

**Acción requerida del instrumento de medición**

Detección de Nivel	
Alto	
Bajo	
Medición Continua	

**Especificaciones del tanque**

¿Es un tanque existente o es un tanque nuevo?

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Especificación de las Brújulas para la instalación del instrumento**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Características del Medio**

¿El medidor está en contacto con el producto? \_\_\_\_\_

¿Se requiere que el instrumento de medición tenga acabado sanitario? S \_\_\_\_\_ NO \_\_\_\_\_

¿Qué producto maneja? \_\_\_\_\_

**Control**

¿Qué señales requiere obtener del instrumento de medición?

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Compatibilidad con el resto de los instrumentos**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Formato 4.2 - Cuestionario para selección de medidores de flujo

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## **CAPÍTULO 5**

### **DESCRIPCIÓN DEL PROCESO (CASO PRÁCTICO)**

#### **5.1 DESCRIPCIÓN DE UN PROCESO EN LA INDUSTRIA DE BEBIDAS**

En este capítulo se presenta el proceso seleccionado para ser utilizado como ejemplo para la aplicación de la metodología propuesta para la selección de:

1. Sensores o interruptores de nivel.
2. Medidores de nivel.
3. Medidores de flujo.

Este caso es tomado de la industria de elaboración de bebidas e incluye la medición y control de flujo y nivel de materias primas de los diferentes productos elaborados.

La principal materia prima para la elaboración de bebidas es el agua. Ésta se obtiene, en la gran mayoría de los casos, de uno o varios pozos profundos, o bien, en ocasiones también puede ser obtenida de la red municipal de agua. Si el agua es extraída de pozos, el flujo extraído es medido para totalizar (Medidor FE-101 de la figura 5.1) el volumen extraído anualmente para el pago de derechos de extracción a la CNA (Comisión Nacional del Agua) y si el agua es obtenida de la red municipal, el flujo también es medido para cuantificar el volumen utilizado y pagar los derechos correspondientes al municipio por el volumen total utilizado.

Dentro de la industria de bebidas se maneja un indicador de productividad el cual consiste en la relación de litros de agua utilizados totales en la planta por los litros de bebida preparados.

Esta relación permite conocer qué tan eficientes son las empresas en el manejo y aprovechamiento del agua. El agua además de ser utilizada como la principal materia prima para la elaboración de bebidas (Medidor FE-108 de la figura 5.1), es utilizada para; lavar y enjuagar envases, procesos de limpieza de equipos, enfriamiento de equipos auxiliares, generación de vapor (Medidor FE-201 de la figura 5.1) y servicios generales, (Medidor FE-200 de la figura 5.1) entre otros usos.

Debido a que el agua es una materia prima cada vez más escasa y la autorización para la perforación de pozos es cada vez más restringida, es importante cuantificar el agua utilizada para que, conociendo el valor del indicador de "litros de agua utilizados/ litros de producto obtenido" se puedan implementar proyectos que permitan eliminar los usos de agua en cantidades no apropiadas.

Para mantener constantes las propiedades organolépticas en el producto terminado (bebida) el agua debe ser sometida a un proceso de tratamiento de sus propiedades físico-químicas, para que, sin importar el origen del agua, ésta cumpla con parámetros establecidos y no afecte el sabor del producto final a elaborarse.

El agua obtenida, ya sea de pozos o de la red municipal, es denominada "agua cruda", a la cual se le agrega cloro alrededor de 3 ppm (partes por millón), para evitar el crecimiento microbiológico (Medidor FE-100 de la figura 5.1). El agua de pozos es descargada en cárcamos desarenadores que permiten eliminar arena proveniente del pozo, y posteriormente es almacenada en tanques o sistemas los cuales deben llevar detectores de nivel para evitar derrames por sobrellenado y detectores de bajo nivel para evitar que el tanque o cisterna quede vacío y las bombas operen sin agua, (Medidores LE-103 y LE-104). El almacenamiento del agua, ya sea en cisternas o en tanques, es a presión atmosférica. El agua se mantiene a temperatura ambiente desde su extracción y durante todo el proceso de elaboración de bebidas. Estos detectores de nivel permiten también generar señales para detener o poner en marcha las bombas de pozo según sea el caso. Para el caso de acumulación de agua, si se requiere conocer el volumen de agua almacenada, se requiere de un medidor de nivel adicional para tener una medición continua del nivel del tanque (Medidor LE-105 de la figura 5.1).

El agua cruda es tratada principalmente para dos grandes usos dentro de las plantas;

- a) En el proceso de elaboración de bebidas.
- b) Servicios Auxiliares de planta y lavado de envase

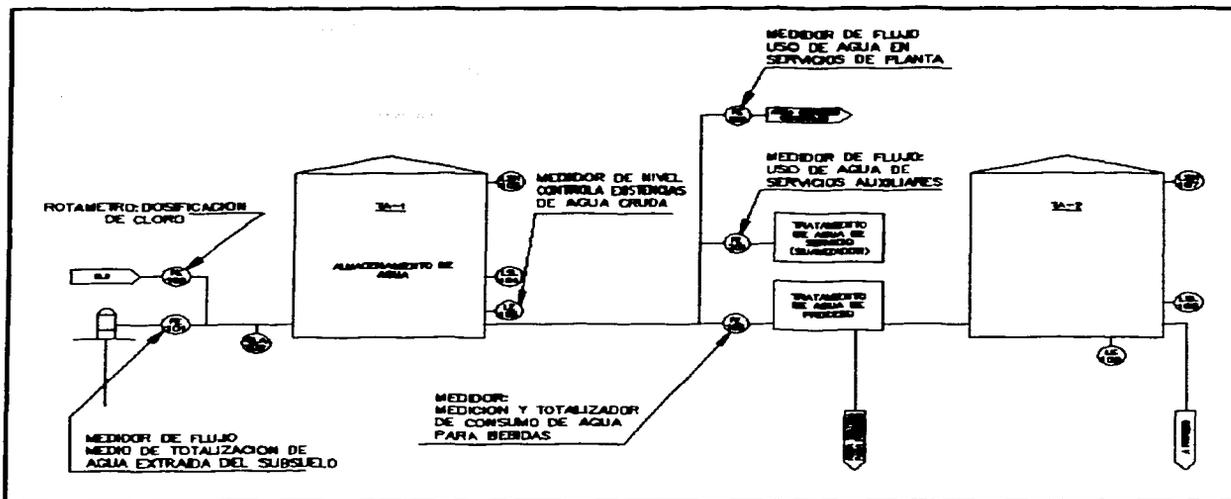


Figura 5.1 - Diagrama de tratamiento de agua

## 5.2 PROCESO DE ELABORACIÓN DE BEBIDAS

El tratamiento del agua a utilizar depende de la composición físico-química del agua cruda. Generalmente incluye un proceso de filtración para la eliminación de partículas, posteriormente, y dependiendo de la composición físico-química del agua cruda, se utiliza un proceso de tratamiento de agua, para la reducción de la alcalinidad del agua, eliminación de hierro, minerales, sólidos y otros elementos no deseados en el agua a utilizar en el proceso de elaboración de bebidas. Los tratamientos frecuentemente más utilizados, dependiendo del tipo de producto a embotellar, son: ultrafiltración, intercambio iónico y ósmosis inversa, entre otros. Finalmente el agua pasa a un proceso de filtración con carbón activado para eliminar el cloro que se añade al agua cruda, un proceso de filtración por cartuchos de 5 micras para eliminar partículas pequeñas y finos de carbón provenientes del filtro utilizado para la eliminación de cloro. El agua obtenida de estos procesos se denomina "agua tratada". El agua cruda utilizada en la elaboración de bebidas es medida mediante un medidor de flujo (Medidor FE-108 de la Figura 5.1) para conocer el rendimiento en el proceso de esta materia prima.

### **5.3 SERVICIOS AUXILIARES DE PLANTA Y LAVADO DE ENVASE**

Los envases utilizados pueden ser retornables o no retornables. Los envases retornables son en su mayoría de vidrio, pero también hay envases de PET retornable. Estos envases, dentro del proceso de embotellado, son lavados mediante 7 minutos de inmersión en agua con sosa con una concentración del 2.5 al 3.5 % y a una temperatura que va desde 50 °C hasta 65°C. Finalmente las botellas son enjuagadas con agua tratada. El agua utilizada en las lavadoras de botellas debe ser agua con una dureza muy baja para evitar incrustaciones de carbonatos en la lavadora y espumas de enjuague.

Servicios auxiliares comprenden los sistemas de generación de vapor, aire comprimido y el sistema de refrigeración principalmente. El proceso de tratamiento de agua utilizado para estos fines es un proceso de intercambio iónico conocido como suavización. El agua obtenida de este proceso es denominada "agua suavizada". El agua suavizada utilizada en planta es medida para poder calcular el indicador de "litros de agua utilizados / litros de producto obtenido" (Medidor FE-201 de la figura 5.1)

Los servicios generales incluyen, lavado de pisos y equipo, sanitarios y riego. El agua utilizada en planta en servicios generales es medida para poder calcular el indicador de "litros de agua utilizados / litros de producto obtenido" (Medidor FE-200 de la figura 5.1)

Debido a que los tratamientos de agua son procesos continuos, no por lotes, se utilizan tanques de balance para dar continuidad al proceso. Estos tanques llevan sensores de alto y bajo nivel para mantener un nivel de agua adecuado para la operación del sistema, evitar derrames en los tanques por sobrellenado y proteger las bombas para que no trabajen en vacío. Estos sensores de nivel pueden generar señales para detener y poner en marcha bombas, o bien, abrir y cerrar válvulas según se requiera.

En el proceso de producción, el flujo de agua es medido principalmente por dos razones;

1. Controlar la cantidad de agua utilizada en la formulación del producto
2. Conocer simplemente para registro la cantidad de agua utilizada para identificar mermas o desperdicios

En el proceso de elaboración de bebidas el agua tratada tiene diferentes usos dentro de la planta:

1. Disolución de Edulcorantes, para elaborar jarabe simple.
2. Disolución del concentrado y sus compuestos sólidos correspondientes (como el ácido cítrico) para elaborar el jarabe terminado.
3. Disolución de los detergentes para la limpieza o saneamiento de los diferentes equipos.
4. Disolución del jarabe terminado para la elaboración de la bebida terminada.

Como se mencionó anteriormente, se utilizan edulcorantes y concentrados que son disueltos en agua tratada para la elaboración de jarabe. Existen tres alternativas para el manejo de los edulcorantes dentro de la industria.

El proceso general de preparación de bebidas carbonatadas se puede resumir en las siguientes operaciones:

#### **5.4 PROCESO GENERAL DE PREPARACIÓN DE BEBIDAS CARBONATADAS**

Para el proceso de preparación de bebidas carbonatadas se detallarán los siguientes apartados:

- a) Disolución y preparación de Edulcorante, la cual puede hacerse en las siguientes formas:
  - a. Utilizando azúcar de caña y disolviendo por lotes.
  - b. Utilizando azúcar de caña y disolviendo en continuo.
  - c. Utilización directa de fructosa.
  - d. Utilización de una mezcla de jarabe de caña de azúcar y fructosa.
- b) Disolución y manejo de concentrado y formulación de jarabe terminado, el cual puede elaborarse de las siguientes formas:
  - a. Formulación de jarabe de bebida terminada sin gas en continuo.
  - b. Preparación por lotes de jarabe terminado y posteriormente disolución en continuo con agua.
  - c. Preparación en continuo de jarabe terminado y posteriormente disolución con agua.
- c) Carbonatación, la cual puede realizarse de las siguientes formas:
  - a. En continuo con medidores másicos.
  - b. Por control de presión y temperatura en un tanque cerrado.
- d) Llenado e inspección del nivel de llenado.

## 5.4.1 DISOLUCIÓN DE EDULCORANTES

### 5.4.1.1 UTILIZANDO AZÚCAR DE CAÑA Y DISOLVIENDO POR LOTES

La primera forma de manejo de edulcorantes y que es el más utilizado en la industria, el manejo de azúcar en sacos de 50 kg. El azúcar es pesada antes de ser utilizada en el proceso de disolución. Dicho proceso en este caso, es un proceso por lotes. El agua tratada utilizada para la disolución de estos edulcorantes, es medida por medio de medidores de flujo (medidor FE-196 de la Figura 5.2) instalados en la tubería de alimentación de agua al tanque de disolución. Esta mezcla de agua con azúcar es denominada "Jarabe Simple" y se mantiene a temperatura ambiente durante todo el proceso y se almacena a presión atmosférica. En los procesos de elaboración de jarabes se utilizan medidores de alto y bajo nivel (Medidores LSH-197, LSL-198, LSH-199 y LSL-200 de la figura 5.2) así como medidores de nivel que permiten saber en tiempo real la cantidad de jarabe que contiene cada tanque (Medidores LE-158 y LE-201 de la figura 5.2)

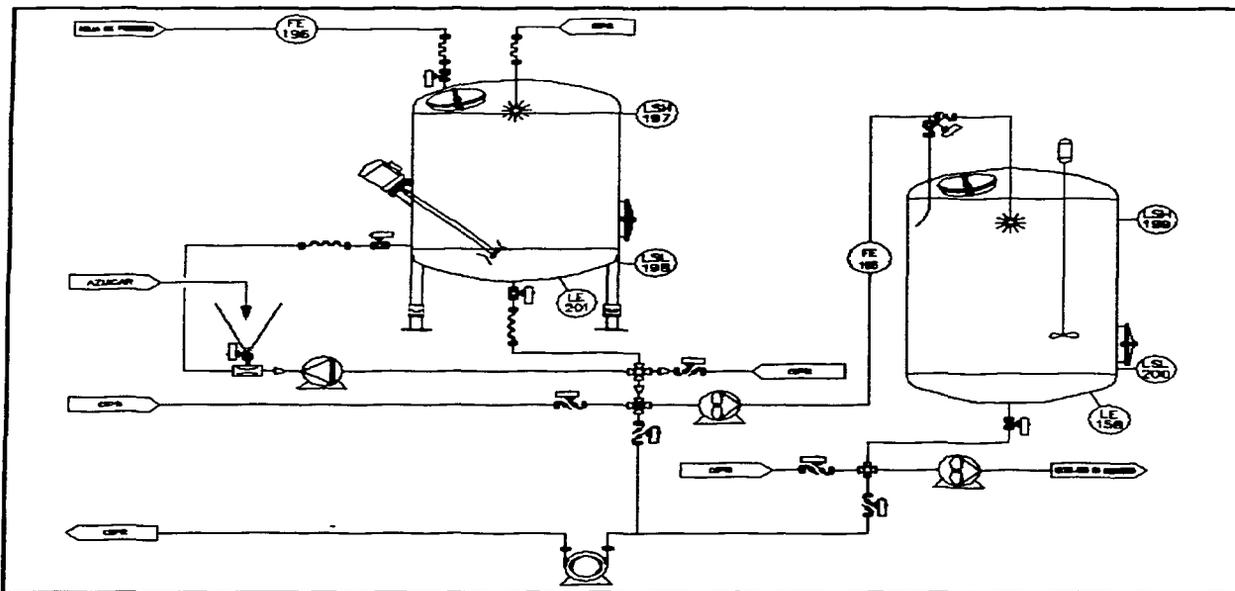


Figura 5.2 - Diagrama de disolución de azúcar por lotes

### 5.4.1.2 UTILIZANDO AZÚCAR DE CAÑA Y DISOLVIENDO EN CONTINUO

La segunda alternativa de manejo de edulcorantes es el manejo de azúcar a granel. El azúcar es almacenada en silos, y su proceso de disolución, puede ser por lotes o en continuo. EL contenido de azúcar a granel en los silos es medida en forma continua por un medidor de nivel especialmente diseñado para este uso. (Medidor LE-121 de la figura 5.3). Tal como sucede en el caso anterior, el agua y el jarabe se mantienen a temperatura ambiente y los tanques de balance operan a presión atmosférica. El nivel de jarabe es controlado por un medidor de nivel colocado en la unidad de disolución en continuo (Medidor LIC-127 de la Figura 5.3)

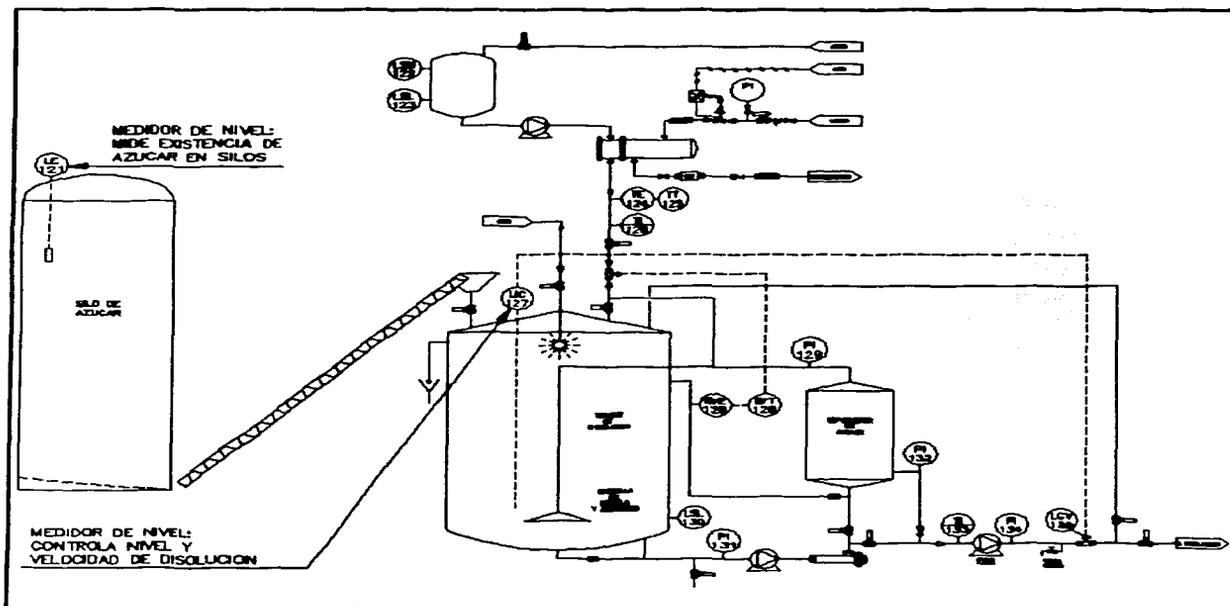


Figura 5.3 - Diagrama de disolución de azúcar a granel

### 5.4.1.3 UTILIZACIÓN DIRECTA DE FRUCTOSA

La tercera alternativa para el manejo de edulcorantes es el manejo de alta fructosa. Este es un edulcorante líquido que se almacena en silos cuyo contenido es medido en forma continua mediante medidores de nivel (Medidores de nivel LE-150 y LE-152 de la figura 5.4) y además los silos cuentan con interruptores de alto nivel descritos en párrafos anteriores (Medidores de Nivel LSH-151 y LSH 153 de la figura 5.4). La fructosa es manejada en planta con medidores másicos y no por peso como el azúcar. (Medidor FE-156 de la figura 5.4)

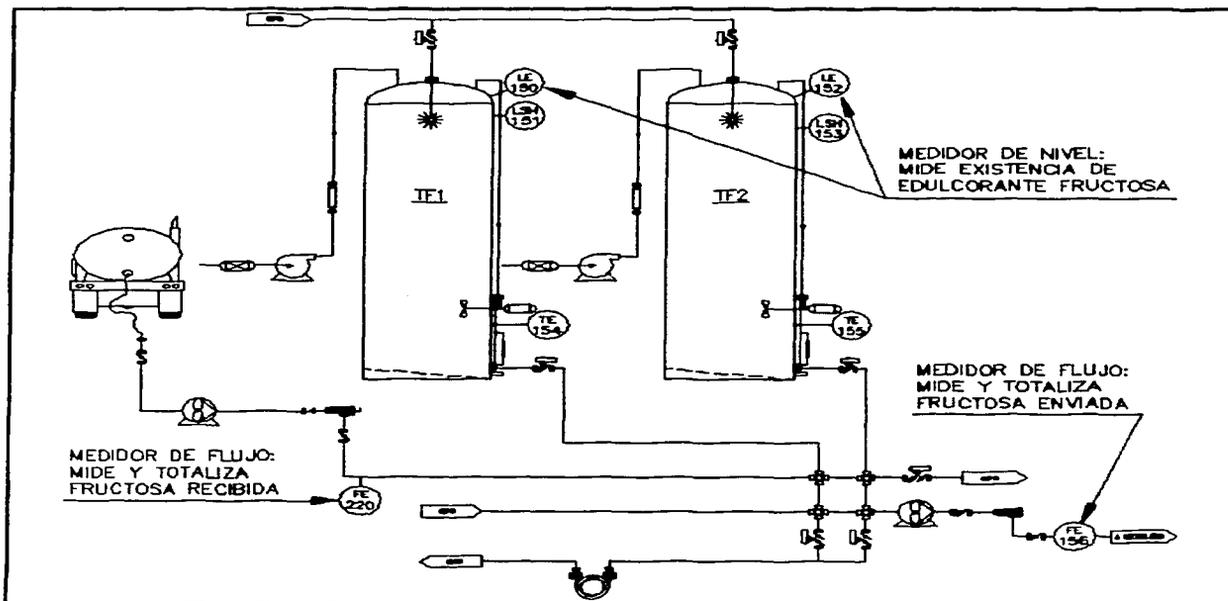


Figura 5.4 - Diagrama de manejo de fructosa

#### 5.4.1.4 UTILIZACIÓN DE UNA MEZCLA DE JARABE DE CAÑA DE AZÚCAR Y FRUCTOSA

La cuarta alternativa para la preparación de edulcorantes es mediante la mezcla de los edulcorantes descritos anteriormente, es decir, usando tanto jarabe de azúcar de caña como fructosa. Estos edulcorantes se manejan como se ha descrito en los párrafos anteriores y se controla la mezcla mediante medidores másicos. (Medidores FE-164 y FT-173 de la figura 5.5).

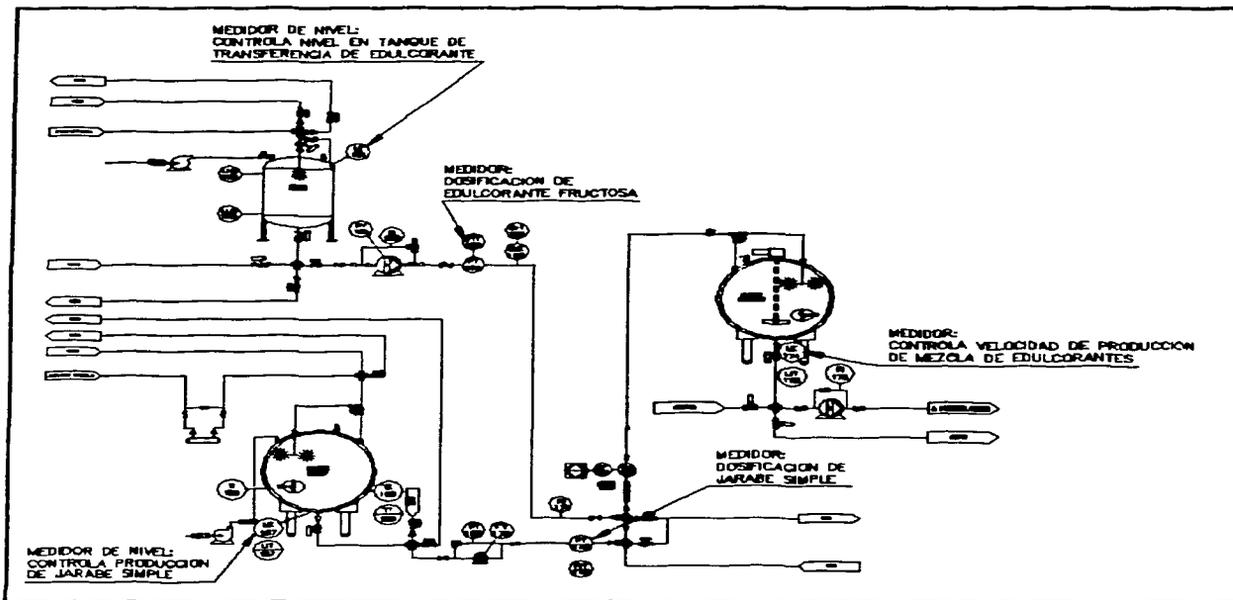


Figura 5.5 - Diagrama de mezcla de jarabe de azúcar con fructosa

## 5.4.2 DISOLUCIÓN DE CONCENTRADOS Y FORMULACIÓN DE JARABE TERMINADO

La segunda etapa del proceso es la disolución de concentrados y saborizantes. Este proceso puede ser por lotes, o puede ser un proceso continuo.

### 5.4.2.1 PREPARACIÓN POR LOTES DE JARABE TERMINADO Y POSTERIORMENTE DISOLUCIÓN EN CONTINUO CON AGUA

En el proceso de disolución de concentrados por lotes, debido a que el concentrado es recibido en las plantas siempre en presentaciones constantes en cuanto a su peso, se conoce de antemano la cantidad de agua a utilizar. El agua es medida mediante medidores de flujo para controlar la cantidad a utilizar (Medidores FE-139 y FE-140 de la figura 5.6). En los proceso por lote, ya sea para la elaboración de jarabe simple o de jarabe terminado, se hace una última revisión de los °B (grados Brix = porcentaje en peso de azúcar en la solución) para validar que se encuentre dentro de especificaciones. Al producto que se obtiene de la mezcla del jarabe simple con el concentrado se denomina "Jarabe Terminado". El jarabe terminado se almacena en tanques que cuentan con medidores de alto y bajo nivel (Medidores LSH 205, 206, 207, 208 y LSL 141,142,143,144 de la fig. 5.6) así como con medidores continuos de nivel que permiten conocer la existencia de jarabe en el tanque en cualquier momento. (Medidores LE 145, 146,147,148 de la fig. 5.6)

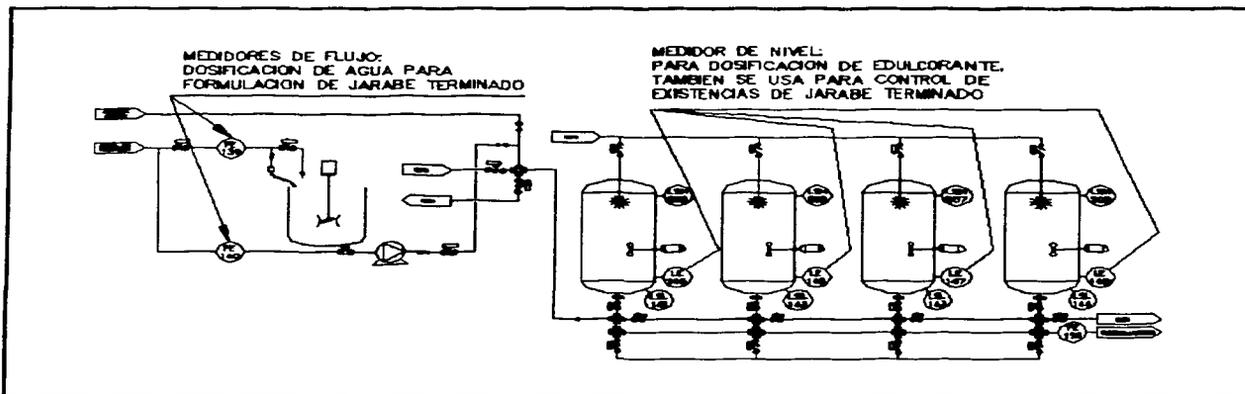


Figura 5.6 - Diagrama de disolución de concentrados y elaboración de jarabe terminado por

### 5.4.2.2 FORMULACIÓN DE JARABE DE BEBIDA TERMINADA SIN GAS EN CONTINUO

Cuando la elaboración de jarabes se lleva a cabo mediante un proceso continuo y no por lotes, la variable a controlar es el flujo. En este caso se utilizan medidores máscicos para controlar la cantidad correcta a utilizar de cada ingrediente, ya que se mezclan simultáneamente; el jarabe simple, los concentrados y el agua (Medidores FE-185, FE-186 y FE-188 de la figura 5.7). Debido a que en los procesos en continuo no se puede realizar la revisión de °B que se hace en los procesos por lote, se requiere de una alta precisión de los medidores máscicos para garantizar que el producto está dentro de especificaciones.

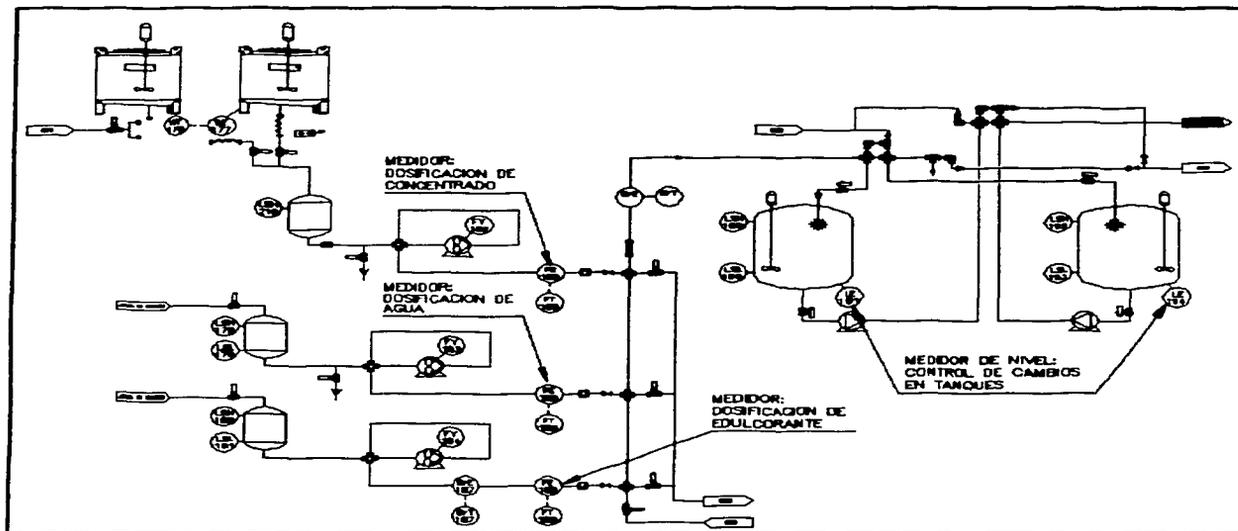


Figura 5.7 - Diagrama de disolución de concentrados y elaboración de jarabe terminado en continuo

### 5.4.3 CARBONATACIÓN DE LA BEBIDA

Si la bebida a elaborarse es carbonatada, es decir que contiene gas carbónico, debe pasar por un proceso de carbonatación, donde se añade el gas carbónico ( $\text{CO}_2$ ) a la bebida. En este proceso se quiere bajar la temperatura de la bebida. Las bebidas a bajas temperaturas presentan una mejor absorción de  $\text{CO}_2$ , además de que a bajas temperaturas la presión de  $\text{CO}_2$  es menor que a temperatura ambiente. Las temperaturas de carbonatación varían de 2 °C a 14 °C, dependiendo del producto a elaborar y de la tecnología disponible por fabricante de bebidas.

#### 5.4.3.1 POR CONTROL DE PRESIÓN Y TEMPERATURA EN UN TANQUE CERRADO

En los equipos tradicionales la cantidad de  $\text{CO}_2$  añadida a la bebida es función de la temperatura del producto y de la presión de  $\text{CO}_2$ . (Ver Figura 5.8)

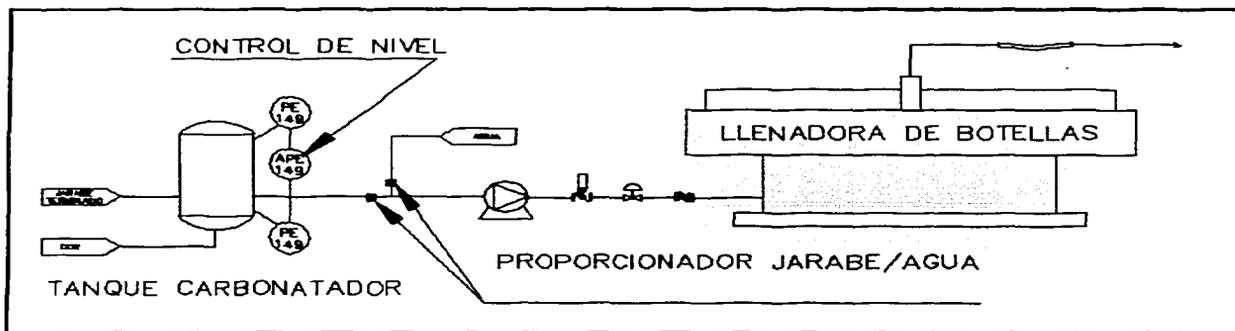


Figura 5.8 - Diagrama de Carbonatación por control de presión y temperatura

#### 5.4.3.2 EN CONTINUO CON MEDIDORES MÁSCOS

En los procesos recientes de carbonatación en línea, la adición de  $\text{CO}_2$  es controlada mediante un medidor máscos de  $\text{CO}_2$  (Medidor FT195 de la figura 5.9).

En los casos en los que se utiliza la carbonatación en línea, se utiliza un tanque de balance entre el carbonatador y la llenadora. (Ver figura 5.9)

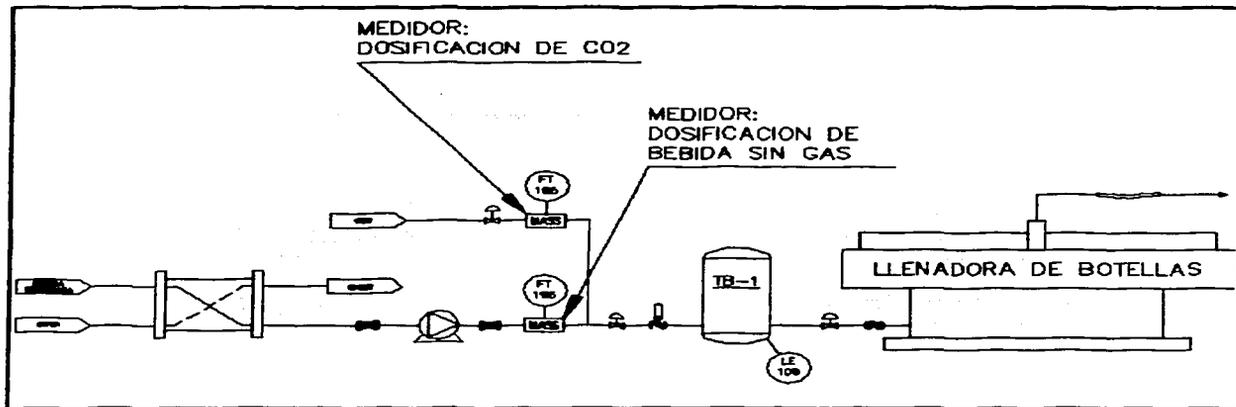


Figura 5.9 - Diagrama de carbonatación en línea

#### 5.4.4 SANEAMIENTO DE TANQUES

Debido a las características del proceso, los tanques deben ser sanitizados mediante un proceso conocido como CIP (Clean in Place) o "Limpieza en el Sitio". Este proceso consta de varios pasos que comprenden, enjuague de tuberías y tanques, limpieza con soluciones con detergentes a 65 °C por un tiempo de 15 minutos, enjuague para remover dichos detergentes, recirculación de agua a 82 °C por un tiempo de 20 minutos y finalmente recircular agua tratada para bajar la temperatura de los equipos recientemente saneados. Debido a estas condiciones del proceso de limpieza, los sensores deben tener las siguientes propiedades:

- Resistente a altas temperaturas,
- Resistente a los agentes químicos (sosa, cloro y ácido peracético),
- Acabo sanitario ya que se encuentran instalados en recipientes donde están en contacto con el producto a embotellar.

El volumen de las soluciones contenidas en los tanques de CIP es controlado por medio de sensores de alto y bajo nivel (Medidores LSH 109, 111 113 y Medidores LSL 110, 112 y 114 de la figura 5.10)

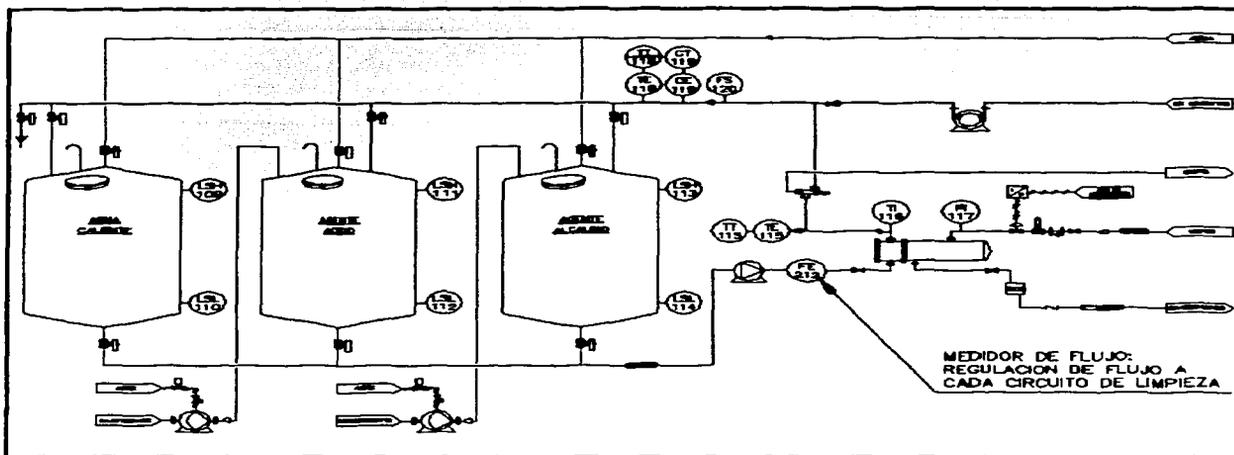


Figura 5.10 - Diagrama del sistema de limpieza CIP

#### 5.4.5 INSPECCIÓN DE NIVEL DE LLENADO

El nivel de llenado del producto terminado es revisado para evitar que empaques bajos de contenido neto que no cumplan con el contenido neto mínimo aceptable salgan al mercado. Los empaques utilizados en las líneas pueden ser de diferentes materiales, tales como, vidrio, PET, y aluminio principalmente. Las velocidades de llenado de las líneas de producción de bebidas son variables y dependen del tipo de tamaño de envase que se esté utilizando, y pueden alcanzar una velocidad de hasta 1100 botellas por minuto, por lo que el inspector de nivel debe ser capaz, no sólo detectar las botellas con nivel de llenado inadecuado, sino que debe también de retirar dichas botellas de la línea para evitar que estas botellas lleguen al consumidor.

Si el producto embotellado genera espuma durante su proceso de embotellado, el inspector de nivel debe ser capaz de distinguir entre el nivel real de llenado de producto y el nivel aparente por la espuma.

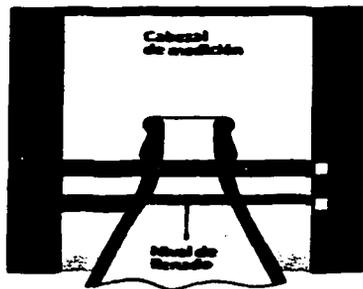


Figura 2.7 - Detección de nivel de llenado en una bebida gaseosa

## CAPÍTULO 6

### APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología propuesta en el presente trabajo, se aplica paso a paso en este capítulo para el ejemplo específico de medidores, tanto de nivel como de flujo, en la producción de bebidas gaseosas.

Se toman específicamente dos partes del proceso (los más completos), en los cuales se aplica la metodología paso a paso y para el resto de los procesos se presentan los datos sintetizados en los anexos A a G.

Con el fin de una correcta comprensión de la metodología se utilizan diferentes colores para permitir una visualización rápida de aquellos instrumentos que son descartados contra los que continúan seleccionados como posibles soluciones durante los diferentes pasos.

El color rojo significa que el instrumento es descartado para la aplicación, el color verde significa que el instrumento es factible de ser usado y puede pasar al siguiente paso de la metodología, mientras que el color amarillo significa que del resultado final, puede ser considerado como una alternativa viable.

#### 6.1 SELECCIÓN DE MEDIDORES EN LA PARTE DEL PROCESO: "AGUA TRATADA" (APARTADO 5.2.1)

Como primer aplicación de la metodología se toma la parte del proceso en la que se tiene almacenada el agua tratada, la cual se usa para la disolución de edulcorantes y concentrados dentro del proceso de elaboración de bebidas carbonatadas. Esta parte del proceso es descrita en el apartado 5.2.1 como *Agua Tratada*.

##### Primer paso (Apartado 4.2.1)

El primer paso de la metodología fue descrito en el paso 4.2.1, bajo el cual se define el estado físico del producto a utilizar. El estado físico del agua tratada al inicio del proceso es líquido. Lo cual se especifica en la tabla 6.1.

4.2.1	Estado Físico del producto	Líquido
	Producto	Agua Tratada

Tabla 6.1 - Paso de la metodología 4.2.1

### Segundo paso (Apartado 4.2.2)

El segundo paso, establecido como 4.2.2, trata sobre la selección de la función a realizar por el instrumento de medición (nivel o flujo y detección o medición continua). En esta parte del proceso se tiene el tanque (TA2, de la figura 5.1 del capítulo 5) que almacena el agua tratada para la disolución del edulcorante, el cual requiere instrumentos de medición para la correcta dosificación y control que se debe dar al producto.

El tanque TA2, mostrado en al figura 5.1, requiere dos instrumentos detectores de nivel, uno máximo y otro mínimo. El máximo para evitar el desbordamiento del agua, el cual tiene la nomenclatura: LSH 107. El instrumento detector de nivel mínimo sirve para evitar que las bombas que transfieren el agua a la siguiente etapa del proceso trabajen en vacío, el cual es identificado como: LSH 106, en la figura 5.1 del capítulo 5.

En el mismo tanque (TA2) se requiere un instrumento de medición de nivel en continuo para saber el nivel de ocupación del tanque, teniendo identificación como: LE 109.

Además, se requiere controlar la dosificación del agua tratada, por lo que se necesita colocar un medidor de flujo en continuo, teniendo identificación como: FE 108.

A manera de recordatorio de la disposición de los equipos se incluye nuevamente la figura 5.1.

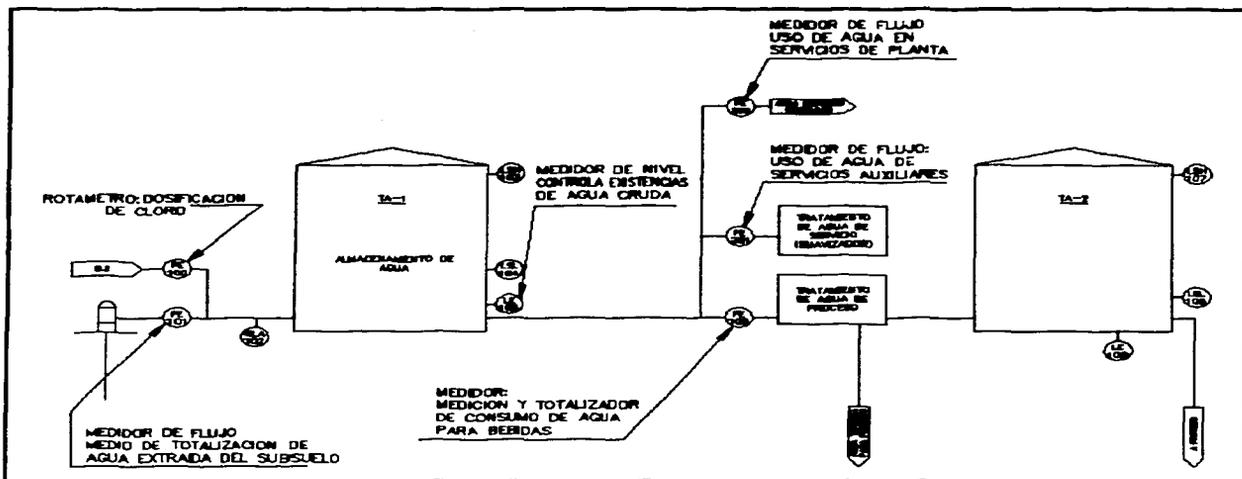


Figura 5.1 - Diagrama de tratamiento de Agua

En resumen, se deben seleccionar dos instrumentos iguales para detección de nivel máximo y mínimo (LSH 107 y LSL 106), un medidor de nivel en continuo (LE 109) y un medidor de flujo en continuo (FE 108). Esto se muestra en la tabla 6.2.

	<b>Función a realizar por el instrumento</b>	<b>Instrumento</b>
4.2.2	Detección de nivel máximo y mínimo en un tanque	LSH 107 y LSL 106
	Medición continua de nivel en un tanque	LE 109
	Medición continua de flujo en tubería de agua tratada	FE 108

Tabla 6.2 - Paso de la metodología 4.2.2

### Tercer paso (Apartado 4.2.3)

En este paso se determinan las propiedades físicas del producto que se utiliza en esta parte del proceso. Para el caso del agua tratada, las propiedades físicas importantes son las que se muestran en la tabla 6.3.

4.2.3	<b>Propiedades físicas del producto</b>	<b>Instrumento</b>
	$\rho = 998 \text{ Kg/m}^3$ ; $U = 1.053 \text{ cSt}$	LSH 107 y LSI 106
	$\rho = 998 \text{ Kg/m}^3$ ; $U = 1.053 \text{ cSt}$	LE 109
	$\rho = 998 \text{ Kg/m}^3$ ; $U = 1.053 \text{ cSt}$	FE 108

Tabla 6.3 - Paso de la metodología 4.2.3

#### Cuarto paso (Apartado 4.2.4)

Para el cuarto paso se definen las condiciones del proceso bajo las cuales se encuentra el agua tratada, las cuales se muestran en la tabla 6.4.

4.2.4	<b>Condiciones del proceso</b>	<b>Instrumento</b>
	Temp = 18° - 25 °C ; Presión = 0.981 Kg/cm <sup>2</sup> = 1 bar	LSH 107 y LSL 106
	Altura tanque = 10 m Diám. $\phi = 5\text{m}$ ; Acero al carbón recubierto	LE 109
	Temp = 18° - 25 °C ; Presión = 0.981 Kg/cm <sup>2</sup> = 1 bar	
	Diámetro de la tubería $\Phi = 10 \text{ cm}$	FE 108
	Temp = 18° - 25 °C ; Presión = 3-5 Kg/cm <sup>2</sup>	

Tabla 6.4 - Paso de la metodología 4.2.4

En el medidor de nivel en continuo (LE 109) se tienen los mismos datos de presión atmosférica y de temperatura ambiente (ya que los tanques no tienen enfriadores o calentadores), pero además se aplica sobre ellos la columna de presión ejercida por el peso del agua tratada, consistente en un tanque de 10 metros de alto y 5 metros de diámetro. La presión ejercida a la salida del tanque es de 1.9 bar máximo como se obtiene en la tabla 6.5.

Valor	Variable	Unidades
20	Area	m <sup>2</sup>
196	Volumen	m <sup>3</sup>
998	Densidad	kg/m <sup>3</sup>
195,957	Peso	kg
97,904	Presión	Pa
0.97		bar

Tabla 6.5 - Obtención de la presión ejercida a la salida del tanque

#### Quinto paso (Apartado 4.2.5)

En este paso se toman en cuenta las posibles restricciones que pueden existir en el proceso como son: el requerimiento de acabado sanitario, restricciones de montaje, precisión de la medición requerida y si es invasivo o no. Los datos de restricciones se encuentran resumidos en la tabla 6.6.

4.2.5	Restricciones del proceso	Instrumento
	Precisión: Var $\pm$ 0.3% / Acabado sanitario	LSH 107 y LSL 106
	Precisión: Var $\pm$ 0.3% / Acabado sanitario	LE 109
	Precisión: Var $\pm$ 0.3% / Acabado sanitario	FE 108

Tabla 6.6 - Paso de la metodología 4.2.5

### Sexto paso (Apartado 4.2.6)

En este paso de la metodología se aplican las tablas 4.1 a 4.4 para eliminar aquellos instrumentos de medición que no cumplen satisfactoriamente con los pasos anteriores, tal como se muestra en la tabla 6.7, donde en color rojo se descartan los medidores que no cumplen con los requerimientos, y en verde los que son viables para continuar en la metodología, como posibles soluciones.

Aplicación de tablas de selección de instrumentos		Tabla	Comentarios
4.2.6	LSH 107 y LSL 106 (detección de nivel máximo y mínimo)	De la Tabla 4.1 Conductivo Capacitivo Ultrasonico Presión Radiométrico Vibratorio	
		De la Tabla 4.1 Capacitivo Ultrasonico Presión Radiométrico Flotador Formada	
		De la Tabla 4.2 Electromagnético Vortice Presión diferencial Ultrasonico	
4.2.6	LE 109 (medición continua de nivel)	De la Tabla 4.3 Conductivo Capacitivo Radiométrico Vibratorio	
		De la Tabla 4.3 Capacitivo Ultrasonico Presión Radiométrico Flotador Formada	
		De la Tabla 4.4 Electromagnético Vortice Presión diferencial Ultrasonico	
4.2.6	FE 108 (medición continua de flujo)	De la Tabla 4.3 Conductivo Capacitivo Radiométrico Vibratorio	
		De la Tabla 4.3 Capacitivo Ultrasonico Presión Radiométrico Flotador Formada	
		De la Tabla 4.4 Electromagnético Vortice Presión diferencial Ultrasonico	

Tabla 6.7 - Paso de la metodología 4.2.6

### Séptimo paso (Apartado 4.2.7)

El séptimo paso es el último paso de la metodología, en el cual, se hace una evaluación de costo-beneficio de las diferentes alternativas resultantes, considerando finalmente la precisión del instrumento y el costo relativo del mismo. Lo anterior se lleva a cabo aplicando las tablas 4.5 y 4.6 del capítulo 4. Los resultados de la aplicación de la metodología propuesta al primer caso, se muestran en la tabla 6.8.

Evaluación de costo y precisión del instrumento	Tabla		Precio relativo
	De la Tabla 4.5	Capacitativa	
LSH 107 y LSH 106 (detección de nivel máximo y mínimo)	Capacitativa	Alternativa y en segundo lugar por tratado de acabado sanitario	5
	Vibratorio	Alternativa y en tercer lugar por tratado de acabado sanitario	500
	Ultrasónico	Alternativa y en segundo lugar por tratado de acabado sanitario	500
LE 109 (medición continua de nivel)	De la Tabla 4.5	Capacitativa	50
	Capacitativa	Alternativa y en tercer lugar por tratado de acabado sanitario	50
	Ultrasónico	Alternativa y en segundo lugar por tratado de acabado sanitario	500
FE 108 (medición continua de flujo)	De la Tabla 4.6	Electromagnético	100
	Electromagnético	Por esta precisión	100
	Precisión diferencial	Alternativa y en segundo lugar por tratado de acabado sanitario	500

Tabla 6.8 - Paso de la metodología 4.2.7

De este ejemplo se concluye que los instrumentos de medición más adecuados son:

- Para los medidores de detección de nivel máximo LSH 106 y LSH 107: se seleccionaron medidores de tipo vibratorio debido a que son de fácil instalación, cumplen con la precisión requerida y su relación costo beneficio es mejor que las otras dos alternativas de tipo ultrasónico y radiométrico (color amarillo).
- Para el medidor de nivel en continuo LE 109: se seleccionó un medidor de tipo ultrasónico debido a que cumplen con la precisión requerida y su relación costo beneficio es mejor que la otra alternativa de tipo radiométrico (color amarillo).
- Para el medidor de flujo FE 108: se seleccionó el medidor de tipo electromagnético, ya que cumple con la precisión requerida, el instrumento con acabado sanitario es más económico que los de desplazamiento positivo o de turbina y debido a que no se requiere una medición de flujo másico, se descarta el de Coriolis.

En la tabla 6.9 se muestra la solución integrada de la metodología propuesta.

4.2.1	Detalle y acción del problema	Instrumento		
4.2.1	Problema	Agua Tratada		
4.2.2	Formación e instalación para el instrumentación	Instrumentos		
4.2.2	Conexión de nivel máximo y mínimo en un tanque	LSH 107 y LSL 108		
4.2.2	Medición continua de nivel en un tanque	LE 109		
4.2.2	Medición continua de flujo en tubería de agua tratada	FE 108		
4.2.3	Formulación de los problemas	Instrumentos		
4.2.3	Forma $h_{max} = 1.083 \text{ cm}$	LSH 107 y LSL 108		
4.2.3	Forma $h_{min} = 1.083 \text{ cm}$	LE 109		
4.2.3	Forma $Q_{max} = 1.083 \text{ cm}^3$	FE 108		
4.2.4	Condiciones del proceso	Instrumentos		
4.2.4	Tanque = 10" x 20" - C. Presión = 3.5 Kg/cm <sup>2</sup>	LSH 107 y LSL 108		
4.2.4	Altura tanque = 10 m. Diámetro de tan. Acero al Carbono recubierta	LE 109		
4.2.4	Temp. = 18" - 20" C. Presión = 3.5 Kg/cm <sup>2</sup>	FE 108		
4.2.4	Diámetro de la tubería $\phi = 10 \text{ cm}$			
4.2.4	Temp. = 18" - 20" C. Presión = 3.5 Kg/cm <sup>2</sup>			
4.2.5	Restricciones del proceso	Instrumentos		
4.2.5	Presión Var = 0.3% / Acabado sanitario	LSH 107 y LSL 108		
4.2.5	Presión Var = 0.3% / Acabado sanitario	LE 109		
4.2.5	Presión Var = 0.3% / Acabado sanitario	FE 108		
4.2.6	Aplicación de tablas de selección de instrumentación	Tabla	Comprobación	
4.2.6	LSH 107 y LSL 108 (detección de nivel máxima y mínima)	De la Tabla 4.3		
4.2.6	LE 109 (medición continua de nivel)	De la Tabla 4.3		
4.2.6	FE 108 (medición continua de flujo)	De la Tabla 4.3		
4.2.7	Aplicación de tablas de selección de instrumentación	Tabla	Comprobación	
4.2.7	LSH 107 y LSL 108 (detección de nivel máxima y mínima)	De la Tabla 4.3		
4.2.7	LE 109 (medición continua de nivel)	De la Tabla 4.3		
4.2.7	FE 108 (medición continua de flujo)	De la Tabla 4.3		
4.2.7	Verificación de costo y precisión del instrumento	Tabla	Comprobación	Precisión
4.2.7	LSH 107 y LSL 108 (detección de nivel máxima y mínima)	De la Tabla 4.3	Alternativa y en segundo lugar por sistema de acabado sanitario	5
4.2.7	LSH 107 y LSL 108 (detección de nivel máxima y mínima)	De la Tabla 4.3	Alternativa y en tercer lugar por sistema de acabado sanitario	555
4.2.7	LE 109 (medición continua de nivel)	De la Tabla 4.3	Alternativa y en primer lugar por sistema de acabado sanitario	65
4.2.7	LE 109 (medición continua de nivel)	De la Tabla 4.3	Alternativa y en segundo lugar por sistema de acabado sanitario	55
4.2.7	LE 109 (medición continua de nivel)	De la Tabla 4.3	Alternativa y en tercer lugar por sistema de acabado sanitario	555
4.2.7	FE 108 (medición continua de flujo)	De la Tabla 4.3	Alternativa y en primer lugar por sistema de acabado sanitario	555
4.2.7	FE 108 (medición continua de flujo)	De la Tabla 4.3	Alternativa y en segundo lugar por sistema de acabado sanitario	55
4.2.7	FE 108 (medición continua de flujo)	De la Tabla 4.3	Alternativa y en tercer lugar por sistema de acabado sanitario	555

Tabla 6.9 - Aplicación de todos los pasos de la metodología al Agua Tratada

## 6.2 SELECCIÓN DE MEDIDORES EN LA PARTE DEL PROCESO: "UTILIZACIÓN DIRECTA DE FRUCTOSA" (APARTADO 5.4.1.3)

El segundo ejemplo de aplicación de la metodología, se toma la parte del proceso en la que se tiene almacenada la fructosa, la cual se agrega durante el proceso global como base de la bebida carbonatada o gaseosa. Esta parte del proceso es descrita en el apartado 5.4.1.3 como *Utilización directa de fructosa*.

### Primer paso (Apartado 4.2.1)

El primer paso de la metodología fue descrito en el paso 4.2.1, bajo el cual se define el estado físico de la materia en el que se encuentra el producto a utilizar. El estado físico de la fructosa al inicio del proceso es líquido. Lo cual se especifica en la tabla 6.10.

4.2.1	Estado Físico del producto	Líquido
	Producto	Disolución de fructosa

Tabla 6.10 - Paso de la metodología 4.2.1

### Segundo paso (Apartado 4.2.2)

El segundo paso, establecido como 4.2.2, trata sobre la selección de la función a realizar por el instrumento de medición (nivel o flujo y detección o medición continua). En esta parte del proceso se tienen dos tanques (TF1 y TF2 de la figura 5.4 del capítulo 5) que almacenan la fructosa para la elaboración del edulcorante, los cuales requieren instrumentos de medición para la correcta dosificación y control que se debe dar al producto.

En los tanques TF1 y TF2 se requieren dos instrumentos detectores de nivel máximo para evitar el desbordamiento del producto, los cuales tienen identificación como: LSH 151 y LSH 153 de la figura 5.4 del capítulo 5.

En los mismos dos tanques (TF1 y TF2) se requieren dos instrumentos de medición de nivel en continuo para saber el nivel de ocupación de dichos tanques, teniendo identificación como: LE 150 y LE 152.

Además, se requiere controlar la dosificación de la fructosa por lo que se necesita colocar un medidor de flujo en continuo, teniendo identificación como: FE 156 de la figura 5.4 del capítulo 5.

A manera de recordatorio de la disposición de los equipos se incluye nuevamente la figura 5.4.

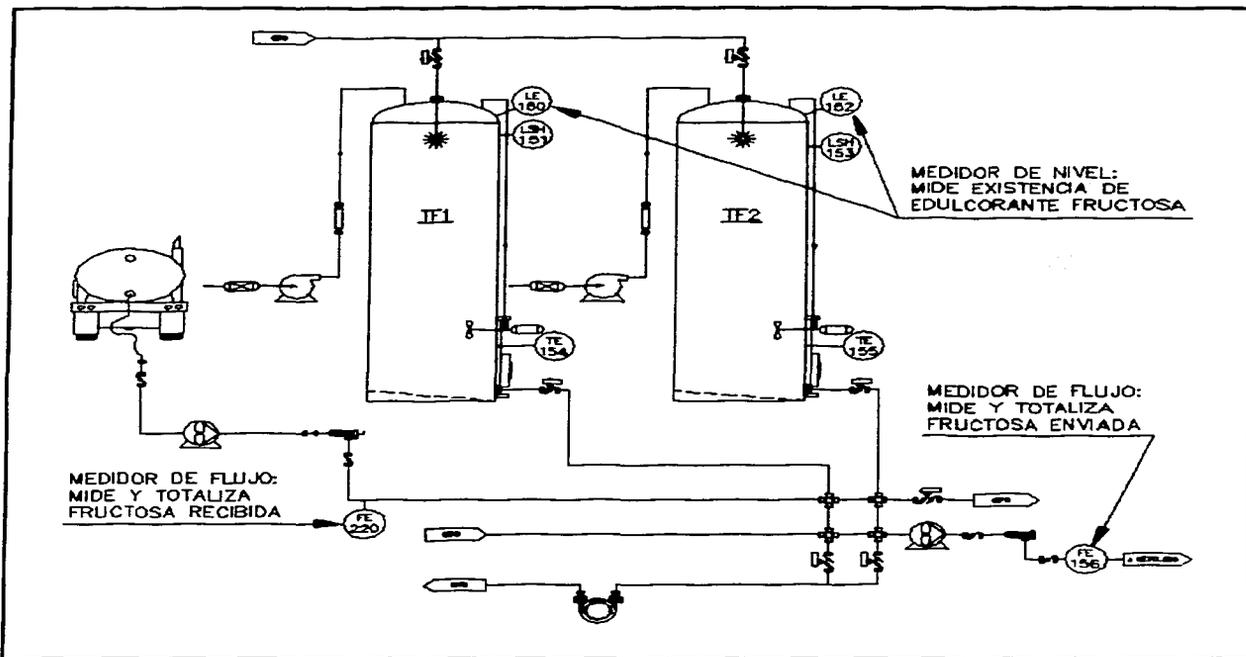


Figura 5.4 - Diagrama de manejo de fructosa

En resumen, se deben seleccionar dos instrumentos iguales para detección de nivel máximo (LSH 151 y LSH 153), dos medidores de nivel en continuo (LE 150 y LE 152) y un medidor de flujo en continuo (FE 156). Esto se muestra en la tabla 6.11.

4.2.2	Función a realizar por el instrumento	Instrumento
	Detección de nivel máximo en Tanques F1 y F2	LSH 151 y LSH 153
	Medición continua de nivel en Tanques F1 y F2	LE 150 y LE 152
	Medición continua de flujo en tubería de fructosa	FE 156

Tabla 6.11 - Paso de la metodología 4.2.2

### Tercer paso (Apartado 4.2.3)

En este paso se determinan las propiedades físicas del producto que se está utilizando en esta parte del proceso. Para el caso de la fructosa, las propiedades físicas importantes son las que se muestran en la tabla 6.12.

4.2.3	Propiedades físicas del producto	Instrumento
	$\rho = 1,350 \text{ Kg/m}^3$ ; $\nu = 593 \text{ cSt}$	LSH 151 y LSH 153
	$\rho = 1,350 \text{ Kg/m}^3$ ; $\nu = 593 \text{ cSt}$	LE 150 y LE 152
	$\rho = 1,350 \text{ Kg/m}^3$ ; $\nu = 593 \text{ cSt}$	FE 156

Tabla 6.12 - Paso de la metodología 4.2.3

### Cuarto paso (Apartado 4.2.4)

Para el cuarto paso se definen las condiciones del proceso bajo las cuales se encuentra la fructosa, las cuales se muestran en la tabla 6.13.

4.2.4	Condiciones del proceso	Instrumento
	Temp = $20^\circ - 25^\circ \text{ C}$ ; Presión = $0,981 \text{ Kg/cm}^2 = 1 \text{ bar}$	LSH 151 y LSH 153
	Altura del tanque = 15 m Diámetro $\phi = 5\text{m}$ ; Acero Inoxidable	LE 150 y LE 152
	Temp = $20^\circ - 25^\circ \text{ C}$ ; Presión = $0,981 \text{ Kg/cm}^2 = 1 \text{ bar}$	
	Diámetro de la tubería $\Phi = 7,5 \text{ cm}$	
	Temp = $20^\circ - 25^\circ \text{ C}$ ; Presión = $3 - 7 \text{ Kg/cm}^2$ ;	FE 156

Tabla 6.13 - Paso de la metodología 4.2.4

En los medidores de nivel en continuo (LE 150 y LE 152) se tienen los mismos datos de presión atmosférica y de temperatura ambiente (ya que los tanques no tienen enfriadores o calentadores cuando se tienen temperaturas ambiente superiores a los  $18^\circ\text{C}$ ), pero además se aplica sobre ellos la columna de presión ejercida por el peso de la fructosa, consistente en un tanque de 15 metros de alto y 5 metros de diámetro. La presión ejercida a la salida del tanque es de 1.9 bar máximo como se obtiene en la tabla 6.14.

Valor	Variable	Unidades
20	Area	m <sup>2</sup>
295	Volumen	m <sup>3</sup>
1,350	Densidad	kg/m <sup>3</sup>
397,607	Peso	kg
198,653	Presión	Pa
1.97		bar

Tabla 6.14 - Obtención de la presión ejercida a la salida del tanque

#### Quinto paso (Apartado 4.2.5)

En este paso se toman en cuenta las posibles restricciones que pueden existir en el proceso como son: el requerimiento de acabado sanitario, restricciones de montaje, precisión de la medición requerida y si es invasivo o no. Los datos de restricciones se encuentran resumidos en la tabla 6.15.

	Restricciones del proceso	Instrumento
4.2.5	Precisión: Var + - 1% / Acabado sanitario	LSH 151 y LSH 153
	Precisión: Var + - 1% / Acabado sanitario	LE 150 y LE 152
	Precisión: Var + - 0.1% / Acabado sanitario	FE 156

Tabla 6.15 - Paso de la metodología 4.2.5

#### Sexto paso (Apartado 4.2.6)

En este paso de la metodología se aplican las tablas 4.1 a 4.4 para eliminar aquellos instrumentos de medición que no cumplen satisfactoriamente con los pasos anteriores, tal como se muestra en la tabla 6.16, donde en color rojo se descartan los medidores que no cumplen con los requerimientos, y en verde los que son viables para continuar en la metodología, como posibles soluciones.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Aplicación de tablas de selección de instrumentos		Tabla	Comentarios
4.2.6	LSH 151 y LSH 153 (detección de nivel máximo)	De la Tabla 4.1 Conductivo Capacitivo Microondas Ultrasonico Presión Radiométrico Vibratorio	
	LE 180 y LE 182 (medición continua de nivel)	De la Tabla 4.1 Capacitivo Ultrasonico Presión Radiométrico Flujido Formada	
	FE 186 (medición continua de flujo)	De la Tabla 4.2 Cortadas	Flujo máximo
Aplicación de tablas de selección de instrumentos		Tabla	Comentarios
4.2.6	LSH 151 y LSH 153 (detección de nivel máximo)	De la Tabla 4.3 Conductivo Capacitivo Microondas Ultrasonico Presión Radiométrico Vibratorio	
	LE 180 y LE 182 (medición continua de nivel)	De la Tabla 4.3 Ultrasonico Presión Radiométrico	
	FE 186 (medición continua de flujo)	De la Tabla 4.4 Cortadas	Flujo máximo

Tabla 6.16 - Paso de la metodología 4.2.6

### Séptimo paso (Apartado 4.2.7)

El séptimo paso es el último paso de la metodología, en el cual, se hace una evaluación de costo-beneficio de las diferentes alternativas resultantes, considerando finalmente la precisión del instrumento y el costo relativo del mismo. Lo anterior se lleva a cabo aplicando las tablas 4.5 y 4.6 del capítulo 4. Los resultados de la aplicación de la metodología propuesta al segundo caso, se muestran en la tabla 6.17.

Evaluación de costos y selección del instrumento		Tabla	Consideraciones	Precio máximo
4.2.7	LSH 151 y LSH 153 (detección de nivel máximo)	De la Tabla 4.2		
		Ultrasónico	Precisión requerida y menor costo	\$50
		Radiométrico	Alto costo relativo, requiere de alta precisión	\$2000
LE 150 y LE 152 (medición continua de nivel)	De la Tabla 4.3			
	Ultrasónico	Precisión requerida y menor costo	\$50	
	Radiométrico	Alto costo relativo, requiere de alta precisión	\$2000	
FE 155 (medición continua de flujo)	De la Tabla 4.6			
	Coriolis	Precisión requerida y menor costo	\$5000	
	Coriolis	Precisión requerida y menor costo	\$5000	

Tabla 6.17 - Paso de la metodología 4.2.7

De este ejemplo se concluye que los instrumentos de medición más adecuados son:

- Para los medidores de detección de nivel máximo LSH 151 y LSH 153: se seleccionaron medidores de tipo vibratorio debido a que son de fácil instalación, cumplen con la precisión requerida y su relación costo beneficio es mejor que las otras dos alternativas de tipo ultrasónico y radiométrico (color amarillo).
- Para los medidores de nivel en continuo LE 150 y LE 152: se seleccionaron medidores de tipo ultrasónico debido a que cumplen con la precisión requerida y su relación costo beneficio es mejor que la otra alternativa de tipo radiométrico (color amarillo).
- Para el medidor de flujo FE 155: se seleccionó el medidor de tipo coriolis (flujo másico) debido a que es el único que aplica para este objetivo.

En la tabla 6.18 se muestra la solución integrada de la metodología propuesta.

4.2.1	Estado físico del producto Producto	Líquido Densidad de Fructosa	
4.2.2	Función o relación por el instrumento Detección de nivel máximo en Tanques F1 y F2 Medición continua de nivel en Tanques F1 y F2 Medición continua de Nivel en tubería de Fructosa	Instrumento LSH 151 y LSH 153 LE 150 y LE 152 FE 156	
4.2.3	Propiedades físicas del producto F1: $\rho = 1,42 \text{ kg/cm}^3$ a 20°C F2: $\rho = 1,42 \text{ kg/cm}^3$ a 20°C F3: $\rho = 1,42 \text{ kg/cm}^3$ a 20°C	Instrumento LSH 151 y LSH 153 LE 150 y LE 152 FE 156	
4.2.4	Condiciones del proceso Temp = 20° - 25 °C, Presión = 0,981 kg/cm <sup>2</sup> = 1 bar Altura del tanque = 15 m Diámetro $\phi = 5$ m, Acero inoxidable Temp = 20° - 25 °C, Presión = 0,981 kg/cm <sup>2</sup> = 1 bar Diámetro de la tubería $\phi = 7,5$ cm Temp = 20° - 25 °C, Presión = 3,7 kg/cm <sup>2</sup>	Instrumento LSH 151 y LSH 153 LE 150 y LE 152 FE 156	
4.2.5	Restricciones del proceso Precisión Var = ± 1% / Acheado estándar Precisión Var = ± 1% / Acheado estándar Precisión Var = ± 0,1% / Acheado estándar	Instrumento LSH 151 y LSH 153 LE 150 y LE 152 FE 156	
4.2.6	Aplicación de tablas de selección de instrumentos LSH 151 y LSH 153 (detección de nivel máximo) LE 150 y LE 152 (medición continua de nivel) FE 156 (medición continua de flujo)	Tabla De la Tabla 4.1 Instrumento Uso Medición Uso De la Tabla 4.1 Instrumento Uso De la Tabla 4.2 Instrumento Uso	Comentarios
4.2.6	Aplicación de tablas de selección de instrumentos LSH 151 y LSH 153 (detección de nivel máximo) LE 150 y LE 152 (medición continua de nivel) FE 156 (medición continua de flujo)	Tabla De la Tabla 4.3 Instrumento Uso Medición Uso De la Tabla 4.3 Instrumento Uso De la Tabla 4.4 Instrumento Uso	Comentarios
4.2.7	Evaluación de costo y precisión del instrumento LSH 151 y LSH 153 (detección de nivel máximo) LE 150 y LE 152 (medición continua de nivel) FE 156 (medición continua de flujo)	Tabla De la Tabla 4.5 Instrumento Uso De la Tabla 4.5 Instrumento Uso De la Tabla 4.6 Instrumento Uso	Comentarios Preciso relativo

Tabla 6.18 - Aplicación de todos los pasos de la metodología a la Utilización Directa de Fructosa

### **6.3 SELECCIÓN DE MEDIDORES EN LA PARTE DEL PROCESO: "AGUA CRUDA" (APARTADO 5.2)**

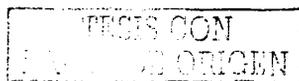
- Para los medidores de detección de nivel mínimo LSH 104 y máximo LSH 103: se seleccionaron medidores de tipo conductivo debido a que son de fácil instalación, cumplen con la precisión requerida.
- Para los medidores de nivel en continuo LE 105 se selecciono un medidor de tipo ultrasónico debido a que cumplen con la precisión requerida.
- Para el medidor de flujo FE 101 se seleccionó el medidor de tipo desplazamiento positivo ya que cumple con la precisión requerida a bajo costo.

En este caso la solución total de la metodología para el Agua Cruda se observa en el Anexo A.

### **6.4 SELECCIÓN DE MEDIDORES EN LA PARTE DEL PROCESO: "JARABE SIMPLE" (APARTADO 5.4.2.1)**

- Para los medidores de detección de nivel máximo LSH 197- 199 y mínimo LSL 198 – 200 se seleccionaron medidores de tipo vibratorio debido a que son de fácil instalación, cumplen con la precisión requerida y su relación costo beneficio es mejor que las otras dos alternativas de tipo ultrasónico y radiométrico (color amarillo).
- Para los medidores de nivel en continuo LE 158 y LE 201: se seleccionaron medidores de tipo ultrasónico debido a que cumplen con la precisión requerida y su relación costo beneficio es mejor que la otra alternativa de tipo radiométrico (color amarillo).
- Para el medidor de flujo FE 173: se seleccionó el medidor de tipo coriolis (flujo másico) debido a que es el único que aplica para este objetivo.

En este caso la solución total de la metodología para el Jarabe Simple se observa en el Anexo B.



## **6.5 SELECCIÓN DE MEDIDORES EN LA PARTE DEL PROCESO: "SANITIZANTE" (APARTADO 5.4.4)**

- Para los medidores de detección de nivel máximo LSH 109, LSH 111 y LSH 113: se seleccionaron medidores de tipo vibratorio debido a que son de fácil instalación, cumplen con la precisión requerida y su relación costo beneficio es mejor que las otras dos alternativas de tipo conductivo y capacitivo.

En este caso la solución total de la metodología para el Sanitizante se observa en el Anexo C.

## **6.6 SELECCIÓN DE MEDIDORES EN LA PARTE DEL PROCESO: "JARABE TERMINADO" (APARTADO 5.4.2)**

- Para los medidores de detección de nivel máximo LSH 205, LSH 206, LSH 207 y LSH 208 para los medidores de detección de nivel mínimo LSH 141, LSH 142, LSH 143 Y LSH 144 se seleccionaron medidores de tipo vibratorio debido a que son de fácil instalación, cumplen con la precisión requerida y su relación costo beneficio es mejor que las otras dos alternativas de tipo ultrasónico y radiométrico (color amarillo).
- Para los medidores de nivel en continuo LE 145, LE 146, LE147 Y LE 148 se seleccionaron medidores de tipo ultrasónico debido a que cumplen con la precisión requerida y su relación costo beneficio es mejor que la otra alternativa de tipo radiométrico (color amarillo).
- Para el medidor de flujo FE 150 se seleccionó el medidor de tipo coriolis (flujo másico) debido a que es el único que aplica para este objetivo.

En este caso la solución total de la metodología para el Jarabe Terminado se observa en el Anexo D.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### **6.7 SELECCIÓN DE MEDIDORES EN LA PARTE DEL PROCESO. "GAS CARBÓNICO" (APARTADO 5.4.3)**

- Para el medidor de flujo FT 195 se seleccionó el medidor de tipo vértice debido a que cumple con la precisión requerida, y tiene una relación costo beneficio superior al medidor de presión diferencial.

En este caso la solución total de la metodología para el Gas Carbónico se observa en el Anexo E.

### **6.8 SELECCIÓN DE MEDIDORES EN LA PARTE DEL PROCESO: "BEBIDA TERMINADA" (APARTADO 5.4.2.2)**

- Para los medidores de nivel en continuo LE 149 se seleccionó un medidor de tipo de presión diferencial debido a que cumplen con la precisión requerida y su relación costo beneficio es mejor que la otra alternativa de tipo radiométrico (color amarillo).

En este caso la solución total de la metodología para la Bebida Terminada se observa en el Anexo F.

### **6.9 SELECCIÓN DE MEDIDORES EN LA PARTE DEL PROCESO: "NIVEL DE LLENADO" (APARTADO 5.4.5)**

- Para los medidores de nivel en continuo se seleccionó un medidor de tipo radiométrico debido a que cumplen con la precisión requerida y permite la revisión de nivel de llenado sin importar el tipo de envase del que se trate ya sea vidrio transparente o lata de aluminio, la cual no permite ver a través de las pared de lata

En este caso la solución total de la metodología para la Inspección de Nivel de Llenado se observa en el Anexo G.

## CONCLUSIONES

Se considera que a través de los capítulos 1 al 3 se ha cubierto el objetivo relativo a la difusión de los principios de medición más comunes y a su aplicación en los procesos de medición de nivel y flujo.

Por otro lado, la metodología propuesta en el Capítulo 4 presenta una secuencia ordenada y lógica para llevar a cabo la selección de él o los principios de medición que resultan viables para una aplicación determinada. Con lo anterior se cumple el principal objetivo de este trabajo, el cual es: Proveer una herramienta para la correcta selección y aplicación de los diferentes principios de medición de nivel y flujo en procesos industriales.

Una vez conocidos los principios físicos descritos en el Capítulo 1 y las aplicaciones que de éstos se hacen para realizar mediciones de variables físicas como son flujo y nivel dentro de procesos industriales, es posible que personal no experto en la materia, siguiendo la metodología propuesta en el presente trabajo, identifique las diferentes alternativas viables para satisfacer un requerimiento específico.

Cualquier persona, aplicando los criterios de selección técnicos y económicos, estará en posibilidad de elegir cuál es el principio de medición a utilizar para su aplicación. De la misma manera, tendrá ahora más herramientas para establecer un diálogo profesional con proveedores y consultores expertos en la materia, con lo cual se están cubriendo los otros dos objetivos que se plantearon. Siendo éstos: Contribuir a cerrar la brecha tecnológica existente entre empresas industriales y proveedores de tecnologías de medición de nivel y flujo y, contribuir a la economía de las empresas, evitando inversiones injustificadas o equivocadas, lo que se traduce en reducciones de costos.

El presente trabajo no pretende sustituir al estudio profundo de cada uno de los principios físicos y sus aplicaciones, labor que desempeñan los fabricantes y diseñadores de equipos e instrumentos de medición, ni el conocimiento adquirido a través de la experiencia de quienes se desempeñan en este campo, por el contrario, pretende que personal no experto tenga acceso a los conocimientos requeridos que le permitan interactuar con estas personas.

La aplicación de la metodología propuesta para la selección de los primarios de medición a utilizar en el proceso de elaboración de bebidas, descrito en el Capítulo 5, arrojó resultados favorables, ya que como se muestra en el Capítulo 6 se puede observar que la funcionalidad y facilidad para emplear la metodología propuesta son muy grandes. Los medidores, tanto de nivel como de flujo, seleccionados en las diferentes etapas del proceso analizado, son los que más se utilizan, en la actualidad, dentro de la industria de elaboración de bebidas.

En resumen, los resultados obtenidos en el presente trabajo en cuanto a la selección y cantidad de medidores a instalar dentro del proceso son los que se presentan en la tabla C.1:

PRODUCTO	INSTRUMENTO		
	NIVEL DE TECCION	MEDICION CONTINUA	FLUJO MEDICION CONTINUA
Agua Cruda	2	1	1
Agua Tratada	2	1	4
Agua para Servicios			2
Jarabe Simple	4	2	2
Fructosa	2	2	3
Concentrado			3
Jarabe Terminado	8	4	1
C02			1
Bebida Terminada		2	1
Nivel de llenado			1
<b>TOTAL</b>	<b>18</b>	<b>12</b>	<b>19</b>

Tabla C.1 - Medidores a utilizar en el caso práctico

El presente trabajo no solo puede ser utilizado como una herramienta para la inducción en el estudio de medición de nivel y de flujo para el personal que requiera capacitarse en el ramo de control y medición en los procesos industriales, sino también como una guía rápida y efectiva de selección de medidores de nivel y flujo para todos los involucrados en esta actividad.

Por todo lo anteriormente escrito, se resumen a manera de conclusión, en una sola frase, una gran cantidad de razones por las cuales el tema de la medición se vuelve una necesidad en los procesos industriales:

*"Lo que no se puede medir no se puede controlar"*

## BIBLIOGRAFÍA

- Plant Engineering Magazine. Cahners Publishing Company. November 21, 1984.
- Beltrán, Virgilio; Brown, Eliezer. Principios de Física. Editorial Trillas. México, 1970.
- Blatt, Frank J. Fundamentos de Física. 3ª edición. Prentice-Hall Hispanoamericana. México, 1991.
- Considine, D.M. Fluid Level Systems, Process/Industrial Instruments and Control Handbook, 4th Ed. McGraw Hill, New York 1993.
- Crowe, Clayton T.; Elger, Donald F.; Roberson, John A. Mecánica de Fluidos. 7ª edición en inglés (1ª edición en español). Compañía Editorial Continental. México, 2002.
- Gieck, Kurt. Manual de Fórmulas Técnicas. 18a. edición. Editorial Alfa Omega. México, 1989.
- Holman, J. P. Experimental Methods for Engineers. 2ª edición. McGraw-Hill Kogakusha. Japón, 1971.
- Kadambi, V.; Manohar, Prasad. Conversión de Energía (Turbomaquinaria) Vol. III. Editorial Limusa. México, 1984.
- Owen, T. Advance Electronics Overcome Mesurement Barriers Control, Feb. 1999.
- Rosnick, Robert; Halliday, David; Krane, Kenneth S. Física. 5ª edición en inglés (4ª edición en español). Compañía Editorial Continental. México, 2002.
- Shames, Irving H. Mecánica de Fluidos. 3ª edición. McGraw-Hill Interamericana. Colombia, 1998.
- Tippens, Paul E. Física Conceptos y Aplicaciones. McGraw-Hill. México, 1981.
- White, Frank M. Mecánica de Fluidos. McGraw-Hill. España, 1990.

- **Páginas Web:**

- [www.flowmeters-ez.com](http://www.flowmeters-ez.com)
- [www.flowmeters.f2s.com](http://www.flowmeters.f2s.com)
- [www.flow-meters.com](http://www.flow-meters.com)
- [www.processassociates.com](http://www.processassociates.com)
- [www.flowmetersdirectory.com](http://www.flowmetersdirectory.com)
- [www.able.co.uk](http://www.able.co.uk)
- [www.endress.com](http://www.endress.com)
- [www.sensorsmag.com](http://www.sensorsmag.com)
- [www.searcheng.co.uk](http://www.searcheng.co.uk)
- [www.rosemount.com](http://www.rosemount.com)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**ANEXOS**

TESIS CON  
FALDA DE ORIGEN

# PAGINACIÓN DISCONTINUA

4.2.1	Formas y datos del producto	Instrumento	
	Producto	Agua Cruda	
4.2.2	Formas y datos por el instrumento		
	Características de nivel máximo y mínimo en el lenguaje A1	LSH 103 y LSL 104	
	Medición continua de nivel en el lenguaje A1	LE 105	
	Medición continua de flujo en lenguaje A1	FE 101	
4.2.3	Propiedades físicas del producto		
	Densidad $\rho = 1.003 \text{ g/cm}^3$	LSH 103 y LSL 104	
	Viscosidad $\mu = 1.003 \text{ cSt}$	LE 105	
	Temperatura $T = 10^\circ \text{ C}$	FE 101	
4.2.4	Características del proceso		
	Temperatura $T = 10^\circ \text{ C}$ , Presión = $0.981 \text{ kg/cm}^2 = 1 \text{ bar}$	LSH 103 y LSL 104	
	Área del tanque = $15 \text{ m}^2$ , Diámetro = $1.39 \text{ m}$ , altura al centro del cubo	LE 105	
	Temperatura $T = 10^\circ \text{ C}$ , Presión = $0.981 \text{ kg/cm}^2 = 1 \text{ bar}$	FE 101	
	Diámetro de la tubería $\phi = 10 \text{ cm}$		
	Temperatura $T = 10^\circ \text{ C}$ , Presión = $0.981 \text{ kg/cm}^2$		
4.2.5	Propiedades del proceso		
	Presión Var = 1%	LSH 103 y LSL 104	
	Presión Var = 1%	LE 105	
	Presión Var = 0.3%	FE 101	
4.2.6	Aplicación de tablas de calibración de instrumentos	Tabla	Comentarios
	LSH 103 y LSL 104 (medición de nivel máximo y mínimo)	De la Tabla 4.3	
	LE 105 (medición continua de nivel)	De la Tabla 4.4	
	FE 101 (medición continua de flujo)	De la Tabla 4.5	
4.2.7	Aplicación de ceros y precisión del instrumento	Tabla	Comentarios
	LSH 103 y LSL 104 (medición de nivel máximo y mínimo)	De la Tabla 4.5	Prueba de cero y precisión
	LE 105 (medición continua de nivel)	De la Tabla 4.5	Prueba de cero y precisión
	FE 101 (medición continua de flujo)	De la Tabla 4.5	Prueba de cero y precisión

Anexo A - Aplicación de todos los pasos de la metodología al Agua Cruda

4.2.1	Estado físico del producto Presión	Líquido Cebollón de azúcar	
4.2.2	Calidad o control por el instrumento Detección de nivel máximo y mínimo en 1 segundo. Medición continua de nivel en 1 segundo. Medición continua de flujo en tubos de burbujas	Instrumentos SH 197-199 y LSL 198-200 LE 198 y LE 201 FE 173	
4.2.3	Propiedades físicas del producto ( $\rho = 1.300 \text{ Kg/m}^3$ ), $\mu = 45 \text{ cSt}$ ( $\rho = 1.300 \text{ Kg/m}^3$ ), $\mu = 45 \text{ cSt}$ ( $\rho = 1.300 \text{ Kg/m}^3$ ), $\mu = 45 \text{ cSt}$	Instrumentos SH 197-199 y LSL 198-200 LE 198 y LE 201 FE 173	
4.2.4	Condiciones del proceso Temp = 20° - 25° C., Presión = 0.981 $\text{kg/cm}^2 = 1 \text{ bar}$ Altura del tanque = 3 m Diámetro $\phi = 2.5 \text{ m}$ , Acero inoxidable Temp = 20° - 25° C., Presión = 0.981 $\text{kg/cm}^2 = 1 \text{ bar}$ Diámetro de la tubería $\phi = 7.5 \text{ cm}$ Temp = 20° - 25° C., Presión = 3 - 5 $\text{kg/cm}^2$	Instrumentos SH 197-199 y LSL 198-200 LE 198 y LE 201 FE 173	
4.2.5	Restricciones del proceso Precisión Var = 1% / Acabado estándar Precisión Var = 1% / Acabado estándar Precisión Var = 0.1% / Acabado estándar	Instrumentos SH 197-199 y LSL 198-200 LE 198 y LE 201 FE 173	
4.2.6	Aplicación de tablas de selección de instrumentos	Tabla De la Tabla 4.1	Comentarios
	LSH 197-199 y LSL 198-200 (detección de nivel máximo y mínimo)	Instrumentos SH 197-199 y LSL 198-200 LE 198 y LE 201 FE 173	
	LE 198 y LE 201 (medición continua de nivel)	Instrumentos LE 198 y LE 201	
	FE 173 (medición continua de flujo)	Instrumentos FE 173	
4.2.6	Aplicación de tablas de selección de instrumentos	Tabla De la Tabla 4.3	Comentarios
	LSH 197-199 y LSL 198-200 (detección de nivel máximo y mínimo)	Instrumentos SH 197-199 y LSL 198-200 LE 198 y LE 201 FE 173	
	LE 198 y LE 201 (medición continua de nivel)	Instrumentos LE 198 y LE 201	
	FE 173 (medición continua de flujo)	Instrumentos FE 173	
4.2.7	Selección de rango y precisión del instrumento	Tabla De la Tabla 4.5	Comentarios
	LSH 197-199 y LSL 198-200 (detección de nivel máximo y mínimo)	Instrumentos SH 197-199 y LSL 198-200 LE 198 y LE 201 FE 173	0000 0000
	LE 198 y LE 201 (medición continua de nivel)	Instrumentos LE 198 y LE 201	0000 0000
	FE 173 (medición continua de flujo)	Instrumentos FE 173	0000 0000

Anexo B - Aplicación de todos los pasos de la metodología al Jarabe Simple

4.2.1	Estado físico del producto Producto	Líquido Soluciones de limpieza		
4.2.2	Función a realizar por el instrumento Detección de nivel máximo y mínimo en tanques	Instrumento LSH 109, 111, 113 y LSL 110, 112, 114		
4.2.3	Propiedades físicas del producto $\rho = 988 \text{ Kg/m}^3$ , $\mu = 1.043 \text{ cSt}$	Instrumento LSH 109, 111, 113 y LSL 110, 112, 114		
4.2.4	Condiciones del proceso Altura de tanque = 1.5 m en acero inoxidable Temp = 62° - 80 °C, Presión = 0.985 kg/cm <sup>2</sup>	Instrumento LSH 109, 111, 113 y LSL 110, 112, 114		
4.2.5	Restricciones del proceso Precisión Var $\pm 0.1\%$ / Acabado sanitario	Instrumento LSH 109, 111, 113 y LSL 110, 112, 114		
4.2.6	Aplicación de tablas de selección de instrumentos LSH 109, 111, 113 y LSL 110, 112, 114 (detección de nivel máximo y mínimo)	Tabla De la Tabla 4.1 Capacitivo Resistivo Inductivo Piezoeléctrico Mecánico Vibratorio	Comentarios	
4.2.6	Aplicación de las tablas de selección de instrumentos Aplicación de tablas de selección de instrumentos	Tabla De la Tabla 4.3 Capacitivo Resistivo Inductivo Piezoeléctrico Mecánico Vibratorio	Comentarios	
4.2.7	Evaluación de costo y precisión del instrumento LSH 109, 111, 113 y LSL 110, 112, 114 (detección de nivel máximo y mínimo)	Tabla De la Tabla 4.5 Capacitivo Resistivo Inductivo Piezoeléctrico Mecánico Vibratorio	Comentarios Alternativo y en segundo lugar por tamaño de acabado sanitario Alternativo y en tercer lugar por tamaño de acabado sanitario	Precio relativo 1 555

Anexo C - Aplicación de todos los pasos de la metodología al Sanitizante

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



4.2.1	Estado físico del producto Producto	Gas CO <sub>2</sub>		
4.2.2	Forma de realizar por el instrumento Medición continua de flujo en línea de CO <sub>2</sub>	Instrumentos FT 195		
4.2.3	Propiedades físicas del producto Gravedad específica = 0.120, $\rho = 0.014$ Cgs	Instrumentos FT 195		
4.2.4	Condiciones del proceso Diámetro de la tubería $\phi = 37.5$ cm - Acero inoxidable Temp = 2° - 5 °C, Presión = 5.7 Kg/cm <sup>2</sup>	Instrumentos FT 195		
4.2.5	Restricciones del proceso Precisión Var = - 1% / Acabado estándar	Instrumentos FT 195		
4.2.6	Aplicación de tablas de selección de instrumentos  FT 195 (Medición continua de flujo)	Tabla	Comentarios	
		De la Tabla 4.2		
		Mejor relación costo-beneficio		
		Mejor relación costo-beneficio		
4.2.6	Aplicación de tablas de selección de instrumentos  FT 195 (Medición continua de flujo)	Tabla	Comentarios	
		De la Tabla 4.4		
		Mejor relación costo-beneficio		
		Mejor relación costo-beneficio		
4.2.7	Evaluación de costo y precisión del instrumento  FT 195 (Medición continua de flujo)	Tabla	Comentarios	Precio relativo
		De la Tabla 4.6		
		Mejor relación costo-beneficio		55
		Mejor relación costo-beneficio		555

Anexo E - Aplicación de todos los pasos de la metodología al Gas Carbónico

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

4.2.1	Estado físico del producto Producto	Líquido con CO <sub>2</sub> Bebida terminada		
4.2.2	Función a realizar por el instrumento Medición continua de nivel en tanque TB1 de bebida terminada	Instrumento LE 109		
4.2.3	Propiedades físicas del producto $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ , $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$	Instrumento LE 109		
4.2.4	Características del proceso Altura del tanque 2 m y diámetro = 1.5 m Temp = 3° - 5 °C. Presión = 29 - 49 kg/cm <sup>2</sup>	Instrumento LE 109		
4.2.5	Restricciones del proceso Precisión Var $\pm$ 1% / Acabado sanitario	Instrumento LE 109		
4.2.6	Aplicación de tablas de selección de instrumentos  LE 109 (medición continua de nivel)	Tabla De la Tabla 4.1 Instrumento Presión Hidroscópico Elevador 2 Elevador	Comentarios	
	Aplicación de tablas de selección de instrumentos  LE 109 (medición continua de nivel)	Tabla De la Tabla 4.3 Instrumento Presión Hidroscópico Elevador	Comentarios	
4.2.7	Evaluación de costo y precisión del instrumento  LE 109 (medición continua de nivel)	Tabla De la Tabla 4.5 Instrumento	Comentarios	Precio relativo
		Referencias Alternativas para costo muy elevada		Costo \$\$\$\$

Anexo F - Aplicación de todos los pasos de la metodología a la Bebida Terminada

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

