



**INSTITUTO POLITÉCNICO  
NACIONAL**  
**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS**

**PROPUESTA DE MEJORA PARA EL MONITOREO  
DE LAVADO DE ENVASE EN LA INDUSTRIA DE  
LAS BEBIDAS.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO QUÍMICO INDUSTRIAL**

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

**LUIS ALFREDO CRUZ NICIO**

**D I R I G I D A**

**M. en E. ARMANDO TONATIUH ÁVALOS  
BRAVO**

**CIUDAD DE MÉXICO, A DICIEMBRE DE 2020**





**PROPUESTA DE MEJORA PARA EL MONITOREO DE LAVADO DE ENVASE EN LA  
INDUSTRIA DE LAS BEBIDAS.  
LUIS ALFREDO CRUZ NICIO**



Escuela Superior de Ingeniería  
Química e Industrias Extractivas  
Subdirección Académica  
Departamento de Evaluación y  
Seguimiento Académico

Folio  
T-DEySA-049-20

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"  
175 Aniversario de la Escuela Superior de Comercio y Administración  
125 Aniversario de la Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía  
80 Aniversario del CECyT 6 "Miguel Othón de Mendizábal"  
75 Aniversario de la Escuela Nacional de Biblioteconomía y Archivonomía

Asunto  
Autorización de tema

CDMX, 07 de septiembre de 2020

Pasante  
**LUIS ALFREDO CRUZ NICIO**  
PRESENTE

Boleta  
2009320739

Programa Académico  
I. Q. I.

Mediante el presente se hace de su conocimiento que la Subdirección Académica a través de este Departamento autoriza al **M en E. Armando Tonatiuh Ávalos Bravo** sea asesor en el tema que propone usted desarrollar como prueba escrita en la opción **Tesis Individual**, con el título y contenido siguiente:

"Propuesta de mejora para el monitoreo de lavado de envase en la industria de las bebidas"

- Resumen.  
Introducción.  
I. Descripción de la maquina.  
II. Descripción del proceso de lavado.  
III. Conceptos básicos de control automático de procesos.  
IV. Instrumentación y control del proceso de lavado de envase.  
V. Propuesta de mejora del sistema de control de la lavadora  
Conclusiones.  
Referencias.

De acuerdo al artículo 33 del Reglamento de Titulación Profesional del Instituto Politécnico Nacional, el trabajo deberá ser concluido en un término no mayor de un año, a partir de esta fecha.

M. en E. Sandra Gloria Villanueva Púnez  
Presidenta de la Academia de  
Diseño e Ingeniería de Apoyo

M en E. Armando Tonatiuh Ávalos Bravo  
Director

Ing. César Rodríguez Guerrero  
Jefe del Departamento de Evaluación y  
Seguimiento Académico.

M. en C. Isaura García Maldonado  
Subdirectora Académica

c.c.p.- Depto. de Evaluación y Seguimiento Académico.  
c.c.p.- Depto. de Gestión Escolar.  
CRG/alcp.

Edificio 7, 1er piso, Unidad Profesional "Abelardo López Hatines", Col. Zacatenango,  
Avenida Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Ciudad de México,  
Computador 01 (55) 57295000 ext. 55103 y 55104 www.eniqie.ipn.mx; www.ipn.mx



**2020**  
LEONA VICARIO  
BENEMÉRITA MADRE DE LA PATRIA



**PROPUESTA DE MEJORA PARA EL MONITOREO DE LAVADO DE ENVASE EN LA  
INDUSTRIA DE LAS BEBIDAS.  
LUIS ALFREDO CRUZ NICIO**



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Politécnico Nacional  
"La Técnica al Servicio de la Patria"

Escuela Superior de Ingeniería  
Química e Industrias Extractivas  
Subdirección Académica  
Departamento de Evaluación y  
Seguimiento Académico

**Folio**  
T-DEySA-049-20

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"  
175 Aniversario de la Escuela Superior de Comercio y Administración  
125 Aniversario de la Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía  
80 Aniversario del CECyT 6 "Miguel Othón de Mendizábal"  
75 Aniversario de la Escuela Nacional de Biblioteconomía y Archivonomía

**Asunto**  
Autorización de Impresión

CDMX, a 10 de diciembre de 2020

**Pasante**  
**Luis Alfredo Cruz Nicio**  
**PRESENTE**

**Boleta**  
**2009320739**

**Programa Académico**  
**I.Q.I.**

Los suscritos tenemos el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el borrador de la modalidad de titulación correspondiente denominado:

**"Propuesta de mejora para el monitoreo de lavado de envase en la industria de las bebidas"**

encontramos que el citado trabajo escrito de **Tesis Individual**, reúne los requisitos para **autorizar el examen profesional y proceder a su impresión** según el caso, debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se le hicieron.

Atentamente  
**JURADO**

  
M. en E. Armando Tonatiuh Avalos Bravo  
Presidente

  
M. en E. Sandra Gloria Villanueva Fúnez  
Secretaria

  
Ing. Javier Díaz Romero  
Vocal 1

  
M. en AP. Vadira Marisol Dávila Ugalde  
Vocal 2

  
Ing. Juan Arturo Sánchez Pascualli  
Vocal 3

c.c.p.- Depto. de Evaluación y Seguimiento Académico.  
c.c.p.- Depto. de Gestión Escolar.  
CRG/mlcp.

Edificio 7, 1er piso, Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", Col. Zacatenco,  
Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Ciudad de México,  
Commutador 01 (55) 57296000 ext. 46140 y 55072 www.esiqie.ipn.mx; www.ipn.mx



**2020**  
**LEONA VICARIO**  
BENEMÉRITA MADRE DE LA PATRIA



PROPUESTA DE MEJORA PARA EL MONITOREO DE LAVADO DE ENVASE EN LA  
INDUSTRIA DE LAS BEBIDAS.  
LUIS ALFREDO CRUZ NICIO



EDUCACIÓN  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Politécnico Nacional  
"La Técnica al Servicio de la Patria"

Escuela Superior de Ingeniería  
Química e Industrias Extractivas  
Subdirección Académica  
Departamento de Evaluación y  
Seguimiento Académico

Folio  
T-DEySA-049-20

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"  
175 Aniversario de la Escuela Superior de Comercio y Administración  
125 Aniversario de la Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía  
80 Aniversario del CECyT 6 "Miguel Othón de Mendizábal"  
75 Aniversario de la Escuela Nacional de Biblioteconomía y Archivonomía

Asunto  
Cesión de derechos

CDMX, a 10 de diciembre de 2020

## CARTA CESIÓN DE DERECHOS

El que suscribe: **Luis Alfredo Cruz Nicio** estudiante del Programa de: **Ingeniería Química Industrial** con número de Boleta: **2009320739**, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo escrito, por la opción: **Tesis Individual**, bajo la dirección del profesor/a **M. en E. Armando Tonatiuh Avalos Bravo** ceden los derechos del trabajo: **"Propuesta de mejora para el monitoreo de lavado de envase en la industria de las bebidas"** al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección de correo electrónico [avalosarma@hotmail.com](mailto:avalosarma@hotmail.com) y [Luis.alfredo.nicio@outlook.com](mailto:Luis.alfredo.nicio@outlook.com). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Atentamente

  
Luis Alfredo Cruz Nicio  
Nombre y Firma del  
estudiante

  
Armando T. Avalos Bravo  
Nombre y Firma  
Del/la director(a)

Edificio 7, 1er piso, Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", Col. Tacatepec,  
Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Ciudad de México,  
Comitador 01 (55) 57296000 ext. 85103 y 85104 [www.esiqie.ipn.mx](http://www.esiqie.ipn.mx); [www.ipn.mx](http://www.ipn.mx)



2020  
LEONA VICARIO



## RECONOCIMIENTOS



Al Instituto Politécnico Nacional por la noble tarea de formar profesionistas capaces de enfrentar los retos que día a día nos impone la sociedad a la que pertenecemos, por la preocupación de brindarnos una educación de calidad, por cambiar nuestra visión y hacer de nosotros profesionistas al Servicio de la Patria.

A la gloriosa Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas por mostrarnos el camino correcto de explotación responsable hacia nuestra madre tierra con el fin de brindar a la sociedad los medios necesarios para alcanzar una calidad de vida que se adecue a las necesidades humanas.





## AGRADECIMIENTOS

A ti abuelita Yolanda García Guerrero por apoyarme incondicionalmente durante toda mi formación profesional, por ser la persona que me impulso para poder realizar mi sueño. Por ser tú la persona que me ha convertido en un ser de provecho. Ahora solo te agradezco todo el esfuerzo que has depositado en mí.

A mi mamá Blanca Patricia Nicio García y a ti papito Alfredo Esquivel Olvera por traerme a este maravilloso mundo, por brindarme todo su amor. Donde quiera que estén los amo y siempre los tengo en mi mente y en mi corazón.

A ti Nallely González García por transformar completamente mi vida por llenarme de alegrías y bendiciones por escucharme en los momentos complicados de mi vida. Por enseñarme toda esa magia que vive en ti.

De todo corazón. GRACIAS



## Contenido

OBJETIVO GENERAL .....	12
OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	12
RESUMEN .....	13
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	14
JUSTIFICACIÓN .....	14
INTRODUCCION .....	15
CAPÍTULO 1 DESCRIPCIÓN DE LA MAQUINA.....	16
1.1. Componentes de la máquina.....	17
1.1.1. Mesa de acumulación.....	17
1.1.1.1. Canales de carga .....	17
1.1.1.2. Dedos auxiliares de empuje .....	17
1.1.2. Cadena de porta canastas o cangilones .....	17
1.1.2.1. Canastas o Cangilones .....	18
1.1.3. Sección de Pre-enjuague .....	18
1.1.4. Tanques de remojo en sosa cáustica .....	18
1.1.5. Secciones de enjuague por inmersión.....	18
1.1.5.1. pre-enjuague .....	18
1.1.6. Sección de enjuague final .....	19
1.1.7. Accionamientos por parte de motorreductores.....	19
1.1.8. Área de descarga de botellas.....	19
1.1.9. Controladores de temperatura.....	19
1.1.10. Rotura de serpentín o calefactor de vapor .....	19
CAPÍTULO 2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE LAVADO .....	20
2.1 Soluciones detergentes .....	20
2.2 Mecanismo de detergencia .....	21
2.3 Elementos esenciales que intervienen en el proceso de lavado .....	22
2.4. Factores que afectan el proceso de lavado.....	23
2.4.1. Tiempo de contacto .....	23
2.4.2. Concentración de la solución caustica .....	23
2.4.3. Concentración de aditivos .....	24
2.4.4. Temperatura de la solución caustica .....	25
2.4.5. Niveles de los tanques .....	26
2.4.6. Baja presión de pre enjuagues, enjuague final y chorros cáusticos .....	26
2.4.7. Botella con alto grado de contaminante (muy sucia).....	27



2.4.8. Cedazos y espumas de tubos rociadores tapadas por contaminantes. ...	28
2.5. El proceso de lavado de botellas.....	29
CAPÍTULO 3 CONCEPTOS BÁSICOS DE CONTROL AUTOMÁTICO DE PROCESOS.....	31
3.1 Elementos del sistema de control.....	32
3.2 Sistema de control de procesos .....	35
3.2.1 Conceptos de instrumentación .....	37
3.3 Instrumentación en la industria de bebidas .....	38
3.3.1 Medida de temperatura .....	39
3.3.2 Termopares .....	40
3.3.3 Detector resistivo de temperatura (RTD).....	40
3.3.4 Medida de presión.....	44
3.3.5 Presión absoluta.....	44
3.3.6 Presión atmosférica.....	44
3.3.7 Presión diferencial.....	45
3.3.8 Presión relativa.....	45
3.3.9 Medidores de presión capacitivos .....	46
3.3.10 Medidores de presión resistivos .....	47
3.3.11 Medida de flujo .....	48
3.3.12 Medidor electromagnético de caudal.....	49
3.3.13 Medidores por desplazamiento positivo .....	51
3.3.14 Indicadores de nivel .....	51
3.4 Arquitecturas de control.....	53
3.4.1 Control por retroalimentación .....	53
3.4.2 Control de relación .....	55
3.4.3 Control en cascada .....	59
3.4.4 Control por acción pre calculada (feedforward).....	62
3.4.5 Control selectivo (sobre flujo) .....	63
3.5 Acciones de control .....	66
3.5.1 Control on-off.....	66
3.5.2 Control proporcional .....	67
3.5.3 Control integral .....	68
3.5.4 Control proporcional e integral .....	69
3.5.5 Control proporcional y derivativo .....	70
3.5.6 Control proporcional integral y derivativo .....	72



CAPÍTULO 4 INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DEL PROCESO DE LAVADO DE ENVASE.....	74
4.1 Situación actual de lavadora .....	75
4.2 Mirillas de vidrio con sensores de alto y bajo nivel.....	77
4.3 Sensores .....	78
4.4 Control de temperatura.....	79
4.5 Monitoreo del proceso y alarmas .....	80
4.6 Control de la concentración de sosa caustica .....	80
CAPÍTULO 5 PROPUESTA DE MEJORA DEL PROCESO DE LAVADO .....	81
5.1 Propuesta para estandarizar a los inspectores visuales .....	81
5.2 Transmisor de presión diferencial .....	85
5.3 Propuesta para controlar el flujo de enjuague final .....	87
5.4 Tanque buffer .....	88
5.5 Propuesta de tanque de caustico .....	89
Conclusión.....	90
Bibliografía .....	91

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.0 Mesa de acumulación.....	17
Figura 1.1 Canales de carga.....	17
Figura 1.2 Cangilones.....	18
Figura 2.0 Mecanismo de detergencia.....	21
Figura 2.1 Proceso de enjuague de botella.....	26
Figura 2.2 Botella con suciedad extrema.....	26
Figura 2.3 Proceso del lavado industrial.....	27
Figura 2.4 Cedazo tapado por residuos contaminantes.....	28
Figura 2.5 Imagen de una lavadora industrial.....	30
Figura 3.0 Diagrama de flujo de control de proceso.....	32
Figura 3.1 Intercambiador de calor.....	35
Figura 3.2 Sistema del control de intercambiador de calor.....	36
Figura 3.3 Termopar.....	40
Figura 3.4 Tipos de sondas.....	42



Figura 3.5 Conexiones de RTD´S.....	42
Figura 3.6 Elemento primario capacitivo .....	46
Figura 3.7 Transductor resistivo.....	47
Figura 3.8 Principio de funcionamiento del medidor electromagnético.....	49
Figura 3.8a Conexión del elemento primario.....	50
Figura 3.9 Mirilla de vidrio montada en tanque.....	52
Figura 3.10 Diagrama de bloques control por retroalimentación.....	53
Figura 3.10a DTI control por retroalimentación.....	54
Figura 3.11 Diagrama de bloques control de relación.....	55
Figura 3.12a Control de relación.....	56
Figura 3.12b Control de relación con controlador de flujo.....	57
Figura 3.12c Control de relación con estación de razón.....	57
Figura 3.13 Control de proporción ideal.....	58
Figura 3.14 Diagrama de bloques de control en cascada.....	60
Figura 3.14a Sistema de control de un intercambiador de calor.....	61
Figura 3.15a Control en cascada con flujo y temperatura.....	61
Figura 3.15b Control en cascada con presión y temperatura.....	61
Figura 3.16 Diagrama de bloques de control recalculado.....	63
Figura 3.17a DTI control feedforward.....	63
Figura 3.18 DTI control selectivo.....	65
Figura 3.19 Diagramas de bloques de control on-off.....	66
Figura 3.20 Brecha diferencial del control on-off.....	67
Figura 3.21 Diagrama de bloques de control proporcional.....	68
Figura 3.22 Diagrama de bloques control integral.....	69
Figura 3.23 Diagrama de bloques control proporcional e integral.....	69
Figura 3.24 Acción proporcional integral con entrada escalón unitario.....	70
Figura 3.25 Diagrama de bloques de control proporcional y derivativo.....	71
Figura 3.26 Acción proporcional y derivativa con entrada rampa.....	71
Figura 3.27 Diagrama de bloques control PID.....	72
Figura 3.28 Acción PID con entrada rampa.....	73
Figura 4.0 Vista exterior e interior de un cárcamo.....	75
Figura 4.1 Saturación de cedazo cilíndrico.....	76
Figura 4.2 Mirilla de vidrio con sensores capacitivos.....	77



Figura 4.3 Sensor capacitivo.....	78
Figura 4.4 Sistema del control de vapor. ....	79
Figura 5.0 Botellas grado cero.....	81
Figura 5.1 Botellas grado uno.....	82
Figura 5.2 Botellas grado dos.....	82
Figura 5.3 Botellas grado tres.....	82
Figura 5.4 botella mal lavada.....	83
Figura 5.5 Saturación de cárcamo por partículas y suciedad.....	85
Figura 5.6 Transmisor de presión diferencial EJX110A.....	86
Figura 5.7 Medidor de flujo Yokogawa ADMAG AXF.....	87
Figura 5.8 Tanque buffer de sosa.....	88
Figura 5.9 Tanque buffer indicando la válvula que se instalara.....	89

## INDICE DE TABLAS

Tabla 3.0 Resistencia de RTD's.....	41
Tabla 5.1 Condiciones óptimas de lavadora (cedazos limpios sin partículas extrañas) .....	82
Tabla 5.2 Resultado del estudio de lavado.....	82
Tabla 5.3 Condiciones con saturación de cedazos por suciedad.....	83
Tabla 5.4 Resultado del estudio de lavado para diferentes grados de suciedad bajo las condiciones de la tabla 5.3.....	83



## OBJETIVO GENERAL

- Generar una propuesta para mejorar el lavado de envase retornable.

## OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Identificar las principales causas del envase mal lavado.
- Implementar equipos de instrumentación para facilitar el control y el monitoreo al operador de una lavadora de botellas.
- Conseguir, mediante el monitoreo de las variables de control, un dominio sobre las acciones o actividades para corregir fallas que puedan provocar deficiencia en el lavado y lograr una mejora continua en el proceso.
- Establecer el criterio para realizar una correcta selección de envase durante la inspección visual.
- Evaluar la efectividad de lavadora, mediante estudios de lavado con envase con diferente grado de suciedad.



## RESUMEN

Debido a la necesidad por satisfacer las expectativas de los consumidores y brindar productos con calidad, se requiere establecer un estricto proceso de lavado de envase retornable para la industria refresquera, mediante la propuesta se buscará tener un equipo más controlado, considerando todas las variables que puedan afectar al proceso.

En la planta actual se cuenta con áreas de oportunidad en la etapa de lavado, razón por la cual se estará planteando una metodología apoyándonos de instrumentación y control, para mejorar el proceso y tener un absoluto control de las diferentes variables, cuando una de ellas salga de especificación se activaran las acciones correctivas para asegurar que el proceso cumpla con el estándar de calidad, también se llevara a cabo estudios de la lavado con diferente grados de suciedad; la finalidad es establecer el criterio para la correcta selección del envase en lámparas de inspección, además se buscara evaluar la efectividad del equipo, realizando estudios de lavado de envase.

Existen dos factores claves que pueden minimizar el impacto de un envase mal lavado, uno se refiere a un cambio en la cultura cuando se utiliza envase retornable, debido a que hay gente que deposita diferentes tipos de residuos al interior del envase como son las colillas de cigarro, envolturas de plástico, servilletas de papel. El otro factor se atribuye al envase expuesto a la intemperie ya que las condiciones climatológicas ocasionan la aparición de insectos, larvas, hongos, bacterias, levaduras y cualquier otro contaminante en las botellas difíciles de remover en el proceso de lavado.

Debido a esta problemática debe existir una etapa previa de inspección visual de selección de envase, pero si es deficiente trae consecuencias significativas en la etapa de lavado, como disminución de presión en chorros cáusticos, taponamiento de espumas, saturación de cedazos, problemas de cavitación en bombas. Generando envase mal lavado.



## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El proceso de lavado es un área de suma importancia para la planta, ya que es donde el envase es esterilizado, solo ciertos envases cumplen con el lavado eficiente y esto se debe en gran medida a la suciedad que contenga el envase, dicha suciedad se puede clasificar de mínima a extrema, uno de los problemas con el que se cuenta es la saturación de cedazos en los diferentes tanques, esto se debe a la gran cantidad de suciedad que tiene la botella, ocasionando diferencial de nivel en los cárcamos, entonces si no se activa una acción correctiva, se corre el peligro que las bombas trabajen en vacío y ocurra el fenómeno denominado cavitación en consecuencia no se tendrá una adecuada presión en los tubos rociadores. Esta problemática sumada a una pobre desinformación en los operadores ocasiona envase mal lavado.

## JUSTIFICACIÓN

Al observar el historial de paros operativos en línea de producción por desviaciones en el proceso de lavado, se tienen contabilizados los siguientes: concentración de sosa baja, temperatura por debajo del requisito establecido, arrastre caustico en la botella, es decir trazas de detergente en la botella.

Los paros por baja concentración no solo tienen consecuencia en los retrasos en la producción, también afecta directamente a la calidad del producto provocando pérdidas económicas, ya que se corre el riesgo que el envase no salga completamente esterilizado provocando crecimiento microbiológico en el producto.

La finalidad de este trabajo es aprovechar los instrumentos de medición actualmente instalados. Además, brindar un apoyo al operador de una lavadora a través de elementos visuales y sonoros para cuando una variable salga de especificación, la maquina pare por completo y el operador ejecute las correcciones y lleve el proceso a condiciones ideales, con esto se logrará tener un control eficaz en la operación actual, en consecuencia, una reducción de costos por eventos de calidad, y eliminar el envase mal lavado.



## INTRODUCCION

El presente trabajo se enfoca en una planta envasadora de bebidas refrescantes y está dedicada al giro alimenticio, esta empresa cuenta con el proceso completo de embotellado, solo se abordará la parte de lavadora, la cual es controlada por un sistema automático computarizado y por 1 operador.

Hoy en día, la palabra calidad es considerada la solución para entregar productos confiables, garantizando un alto estándar en su elaboración, para lograrlo se necesita tener una buena planeación, implementación y mejora continua.

La búsqueda de la mejora continua en el proceso de lavado de botellas retornables es de suma importancia ya que se necesita tener un proceso controlado la finalidad buscar remover toda la suciedad y materia extraña del interior y exterior de los envases retornables. Las condiciones de lavado deben eliminar levaduras, hongos y bacterias patógenas y no patógenas, obteniendo así envases estériles.

La lavadora de botellas al ser muy antigua sus parámetros de funcionamiento no cumplen las exigencias a las que el proceso requiere, este trabajo de investigación está enfocado en analizar los parámetros de lavado y fallas que la máquina tiene.

En el capítulo 1 se realiza una descripción breve de las partes que está constituida una lavadora de botellas, la finalidad es comprender un poco más del diseño. El capítulo 2 se refiere a conceptos del proceso de lavado y las variables que intervienen, aquí se explica las etapas de lavado. Para entender mejor el control de procesos y la instrumentación es necesario tener ciertos conocimientos previos, los cuales son muy extensos, pero en el capítulo 3 se puede encontrar una breve semblanza de estos. Para poder realizar una mejora es necesario conocer su funcionamiento, los instrumentos de medición y control con los que cuenta esta lavadora, lo cual es revisado en el capítulo 4. Es necesario establecer si los instrumentos con los que cuenta dicha lavadora son los adecuados o en su defecto si se requiere cambiarlos, también se podrá observar si el sistema de control está funcionando de manera adecuada y si es necesario realizar alguna modificación lo cual se describe en el capítulo 5.



## CAPÍTULO 1 DESCRIPCIÓN DE LA MAQUINA

Para comprender las características de una lavadora de botellas retornables, es necesario conocer el diseño y funcionamiento; La elección de una lavadora para la industria refresquera dependerá de las características del envase.

Básicamente existen tres tipos de lavadoras de botellas:

- Lavadora de doble extremo, con múltiple compartimento de remojo.
- Lavadora de doble extremo, con un solo compartimento de remojo.
- Lavadora de solo un extremo, con un solo compartimento de remojo.

Cada tipo de unidad presenta ventajas y desventajas. Las máquinas de doble extremo son utilizadas principalmente cuando las botellas sucias contienen sustancias difíciles de remover o cuando han pasado mucho tiempo expuestas.

Las máquinas de un solo extremo son prácticas cuando las botellas contienen principalmente residuos de bebida. Este tipo de lavadora ofrece ventajas en cuanto a los costos y el reducido espacio que ocupan en la instalación, sin embargo, deben de tomarse consideraciones más estrictas en la zona de ingreso de botellas para evitar la contaminación.

La máquina que se describe en este capítulo es de doble extremo, las botellas entran por una extremidad y salen por la otra. La característica de este tipo de lavadora es un largo tiempo de remojo, con la posibilidad de haber varios tanques de solución caustica. Este arreglo permite que la maquina trabaje con temperaturas elevadas sin riesgo de choque térmico, pues existe una escala gradual de temperatura entre los tanques.

Las condiciones de operación mecánica de una lavadora son un factor muy importante que regula la eficiencia del lavado de botellas y gastos de funcionamiento. Si una máquina está en malas condiciones mecánicas, la eficiencia de lavado disminuye. La pérdida de poder de limpieza suele ser compensada con un aumento en las concentraciones de químicos. Esto aumenta los costos. Para lograr un alto nivel de limpieza con bajos costos operativos, es fundamental mantener la máquina en óptimas condiciones de funcionamiento mecánico. Como ejemplo, es muy importante que todas las boquillas de los inyectores de lavado sean del tamaño correcto y que estén en la alineación adecuada. La desalineación de las boquillas en la sección de enjuague o lavado son causa suficiente para un lavado deficiente. El mantenimiento regular y periódico es esencial para asegurar una operación de lavado de botellas eficiente.

Es necesario analizar los componentes de la lavadora para evaluar, planear, proyectar, organizar, rutinas de mantenimiento con el fin de dar respuesta a las necesidades que surgen durante la operación de dicha lavadora, para garantizar el correcto funcionamiento de cada una de las partes de dicha máquina.



## 1.1. Componentes de la máquina

### 1.1.1. Mesa de acumulación

Está compuesta por cadenas de acero inoxidable, las cuales transportan las botellas sucias hacia la sección de (cangilones) metálicos o de plástico.

El objetivo de la mesa de carga es de alimentar una cantidad amplia de botellas hacia las guías de carga.



Figura 1.0 Mesa de acumulación.

#### 1.1.1.1. Canales de carga

Los canales de carga están diseñados para canalizar y colocar debidamente las botellas.



Figura 1.1 Canales de carga.

#### 1.1.1.2. Dedos auxiliares de empuje

Dedos oscilantes colocados delante de las guías de carga, proveen constante flujo de botellas e impedirán que se traben.

### 1.1.2. Cadena de porta canastas o cangilones

Está diseñada para tener una larga vida, evitando el estiramiento. Los pernos y los bujes de la cadena son de acero endurecido con una superficie máxima de apoyo, los rodillos son de cara ancha para máximo contacto con la superficie.

### 1.1.2.1. Canastas o Cangilones

Recipientes metálicos o plásticos que tienen como función principal conducir las botellas dentro de la lavadora debido a su forma y construcción.



Figura 1.2 Cangilones.

### 1.1.3. Sección de Pre-enjuague

Después que las botellas han sido introducidas a las canastas, éstas viajan en dirección ascendente, hasta llegar a esta sección, el pre-enjuague, que es un rociado inicial con agua tibia.

Tres hileras de flautas o tubos con boquillas a presión tienen el objetivo de aflojar cualquier material extraño que tengan las botellas, esta acción impide la contaminación innecesaria de la sosa cáustica del primer tanque de remojo.

### 1.1.4. Tanques de remojo en sosa cáustica

La lavadora contiene varios tanques de remojo, los cuales están a distintas temperaturas y concentraciones de sosa cáustica. Los tanques de remojo tienen como objetivo la limpieza y esterilización de las botellas de vidrio.

### 1.1.5. Secciones de enjuague por inmersión.

Después de que los tanques de remojo han eliminado cualquier material extraño de las botellas, estas son transportadas un tanque donde las botellas se enjuagan por inmersión.

#### 1.1.5.1. pre-enjuague

Las botellas son transportadas a ocho hileras de flautas alternadamente espaciadas. Estas flautas o chorros son colocados debajo de las bocas de las botellas y se dispara un chorro de solución cáustica a baja concentración adentro de las botellas, puliéndolas completamente. El accionamiento alterno de las flautas permite el drenaje adecuado de la botella antes que la siguiente flauta entre al fondo de la botella.

Verificar la correcta alineación observando si los chorros ingresan en la botella. Si el chorro no ingresa a la botella e impacta lateralmente, estamos ante un desalineamiento.



### 1.1.6. Sección de enjuague final

Las botellas lavadas son trasladadas a la sección de enjuague final a alta presión, en esta parte se enjuaga la botella con agua tratada, con el objetivo de remover cualquier rastro de sosa cáustica que pudiera tener, quedando la botella limpia y comercialmente esterilizada.

Frecuentemente ocurre por un problema en partes mecánicas de la máquina, el chorro de agua se “desfasa” y la apertura se realiza una vez que la botella ha pasado. La solución de este problema es simple pero importante porque está en riesgo la calidad de la botella lavada.

### 1.1.7. Accionamientos por parte de motorreductores

Los motorreductores accionan el movimiento de las cadenas porta canastas o cangilones. A estos motorreductores les llamamos traductores de fuerza.

### 1.1.8. Área de descarga de botellas

Las botellas se descargan por gravedad a las levas rotativas, las cuales las descargan al envase en forma suave.

### 1.1.9. Controladores de temperatura

Los controladores automáticos de temperatura son válvulas con la función de controlar la temperatura de la solución (agua + sosa cáustica) en los tanques de remojo. Estos controladores permiten el paso del vapor hacia los serpentines calentadores, según sea la necesidad y mantener con esto la temperatura de la solución.

### 1.1.10. Rotura de serpentín o calefactor de vapor

Esta observación es simple; Se requiere para esto fenolftaleína. Sacar una muestra de condensado de cada calefactor y aplicar 1 o 2 gotas. Si la muestra se colorea rosada, significa que el serpentín está roto. Esto significa que el vapor está pasando directamente a la solución de lavado, lo cual incrementa la precipitación e incrustación de carbonatos de calcio, acidificando la solución cáustica e incrementando el consumo de sosa.



## CAPÍTULO 2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE LAVADO

La finalidad de este capítulo es comprender el proceso de lavado de envase retornable, es necesario describirlo y profundizar en las variables que influyen para la correcta limpieza y esterilización, además se abordan conceptos teóricos del mecanismo de la detergencia.

### 2.1 Soluciones detergentes

Los detergentes, al igual que los jabones y otros compuestos, se llaman agentes tensoactivos, pues al disolverse en agua modifican su tensión superficial. La tensión superficial es un fenómeno que se presenta en la superficie de cualquier líquido, que se comporta como una membrana en tensión debido a las fuerzas intermoleculares que existen en la interfase. Los líquidos cuyas moléculas tienen fuerzas de atracción intermoleculares fuertes tienen tensión superficial elevada. En el caso del agua, las fuerzas intermoleculares de atracción entre sus moléculas se deben a puentes de hidrógeno, que son enlaces intermoleculares fuertes, por lo que la tensión superficial del agua es mayor que la de muchos otros líquidos.

Todos los tensoactivos tienen una estructura molecular común que consiste en una larga cadena no polar, casi siempre una cadena hidrocarbonada, la cual es soluble en aceite pero insoluble en agua (parte hidrofóbica); esta cadena está unida a otros grupos polares (como carboxilato  $CO_2^-Na^+$  o sulfonato  $SO_3^-Na^+$ ) que son insolubles en aceite pero solubles en agua (parte hidrofílica). El extremo hidrofílico es suficiente afín al agua para conferir solubilidad en ella a todo el compuesto.

Un detergente está formado por uno o varios agentes tensoactivos y una serie de complementos que ayudan la acción de los primeros, tales como aditivos. El resultado final es un producto que además de producir una limpieza eficiente, ejerce un efecto de protección a la superficie a la cual se aplica, proporcionando al objeto lavado una serie de características deseadas en cuanto al color, olor y tacto.

Cuando las moléculas tensoactivas están en contacto con agua, los grupos hidrofílicos están solvatados en agua, mientras que los grupos hidrofóbicos se alejan de ella ordenándose en la superficie del agua formando una monocapa. Así, las fuerzas intermoleculares (puentes de hidrógeno), que normalmente dan al agua una alta tensión superficial, quedan superadas, la tensión superficial disminuye y el agua forma espuma y burbujas con facilidad.

En el interior de la solución, las moléculas del agente tensoactivo forman micelas, los grupos hidrofílicos se encuentran en el exterior y los hidrofóbicos en el interior, lo que minimiza el contacto agua- grupo no polar y maximiza la interfase entre grupos no polares y la de estos con el agua.

## 2.2 Mecanismo de detergencia

Un sistema detergente eficaz debe realizar dos funciones, desprender la suciedad de la superficie a limpiar, y dispersar la suciedad en el líquido de lavado, de tal modo que el sustrato limpio pueda separarse del líquido de lavado sin que la suciedad se deposite sobre él. La clave de ambos requisitos radica en la naturaleza de las interfases entre el sustrato, la suciedad y el líquido de lavado. Por ello los detergentes contienen moléculas que son adsorbidas por éstas superficies, modificando la tensión superficial de las interfases.

El proceso de limpieza de un detergente se basa, primero, en la rotura de la capa de grasa, por medios mecánicos (agitación, restregado, vibraciones...) para formar gotitas microscópicas y, segundo estabilización y dispersión en agua de dichas gotitas al quedar cubiertas por las moléculas de detergente. Las partículas coloidales de grasa quedan envueltas por cargas negativas hidrófilas que se solvatan y se repelen entre sí, impidiendo su reagrupación y, estabilizando así la dispersión.

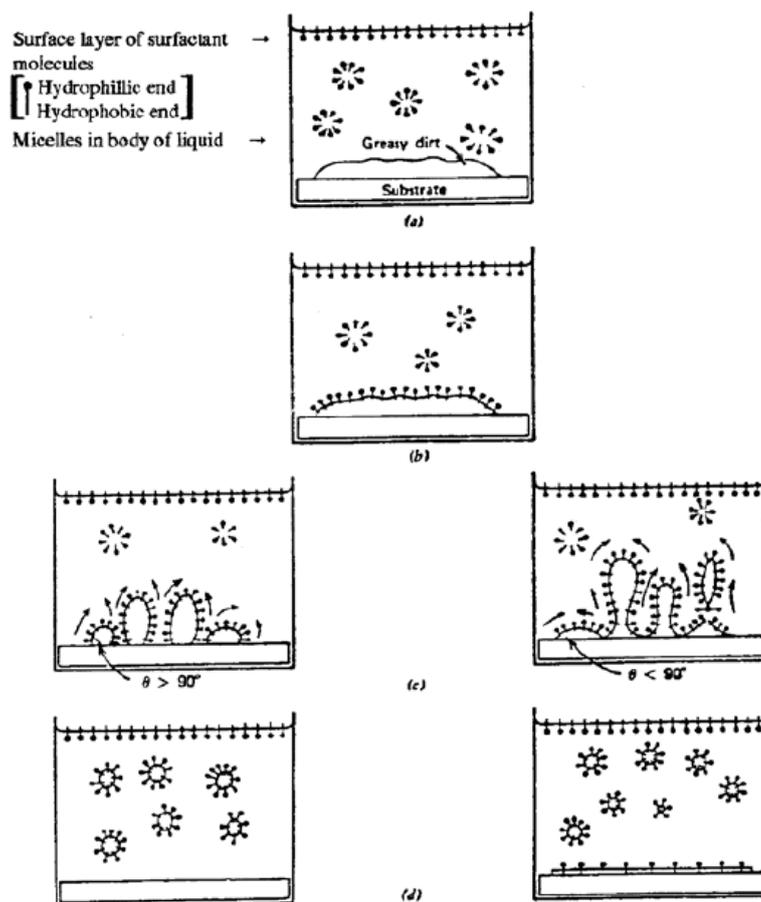


Figura 2.0 Mecanismo de detergencia



Efecto “solubilizador” de los agentes tensoactivos: a) La mugre grasienta entra en contacto con la solución de tensoactivo; b) Los extremos hidrofóbicos de las moléculas de tensoactivo se disuelven en la grasa; c) El tensoactivo modifica el ángulo de contacto  $\theta$  entre la suciedad y el sustrato. Si ( $\theta < 90^\circ$ ) es imposible que haya una eliminación total de la grasa; d) Más agitación desplaza la suciedad en forma de partículas macroscópicas. Estas forman una emulsión cuando hay agitación suficiente.

### 2.3 Elementos esenciales que intervienen en el proceso de lavado

- El sustrato es el material que se desea limpiar, la facilidad de limpieza de un sustrato depende de su forma, tamaño, textura y composición química. En general las superficies lisas se limpian mejor que las superficies rugosas y agrietadas. La hidrofobicidad del sustrato también desempeña un papel importante en el lavado, las fuerzas de adhesión entre el sustrato y la suciedad común de tipo alimentario, disminuye si el compuesto es hidrofóbico, y por el contrario aumentan si el sustrato tiene carácter hidrofílico. Por ejemplo, el vidrio actúa como sustrato hidrofílico y por lo tanto es más difícil de limpiar que el plástico o el teflón los cuales carecen de puntos polares en su superficie.
- La suciedad: Materias extrañas que se desean eliminar de la superficie del sustrato. La eliminación de la suciedad, no solo depende de sus interacciones específicas con la superficie del sustrato y con los componentes de la solución de lavado. Entre las suciedades líquidas oleosas, las que contienen ácidos grasos se eliminan con mayor facilidad.

Las suciedades deshidratadas son más difíciles de limpiar como consecuencia del aumento de las fuerzas de Van der Waals.

- La solución detergente: Es el medio líquido que actúa sobre el sustrato para eliminar la suciedad. Los tensoactivos favorecen la detergencia disminuyendo la tensión superficial, emulsionando y/o solubilizando la suciedad. En lo que a concentración se refiere a la detergencia aumenta con la concentración del tensoactivo.
- Calidad del agua: La dureza del agua debido a la presencia de cationes polivalentes (sobre todo de calcio y magnesio) dando lugar a formación de sales insolubles con numerosos tipos de tensoactivos, bajo determinadas condiciones estos iones pueden llegar a reducir los potenciales eléctricos de las partículas de suciedades disueltas en la solución de lavado, provocando floculación y la redeposición de las mismas. Para evitar la pérdida de material activo se utilizan agentes que complejan o secuestran dichos iones evitando que estos formen parte de reacciones indeseadas.



A continuación, se describirá básicamente las condiciones que afectan el proceso de lavado de acuerdo a lo observado durante la operación de la máquina.

## 2.4. Factores que afectan el proceso de lavado

- Tiempo de contacto.
- Concentraciones de la solución caustica.
- Concentración de aditivo.
- Temperatura de la solución caustica.
- Niveles de los tanques.
- Baja presión de pre enjuagues, enjuague final y chorros cáusticos.
- Botella con alto grado de contaminante (muy sucia).
- Cedazos y espreas de tubos rociadores tapadas por contaminantes.

### 2.4.1. Tiempo de contacto

Es el tiempo que el envase pasa sumergido en la solución de lavado. Hay que considerar los siguientes factores:

- Un tiempo de contacto corto afecta negativamente al proceso de lavado en consecuencia se tendrá una botella mal lavada y sucia.
- Un tiempo de contacto largo afecta las botellas de pet con agrietamiento y deformación.

### 2.4.2. Concentración de la solución caustica

La concentración de la solución caustica en los tanques de lavado es una variable de control, y esta afecta directamente a la calidad.

El efecto de limpieza primario logrado mediante el remojo de las botellas en solución cáustica es mediano. Entonces el uso de solución caustica sola no siempre es suficiente. La sosa cáustica en sí misma ofrece limitadas propiedades detergentes y puede acelerar el daño a la botella cuando el grado de concentración excede los niveles recomendados.

Dadas sus propiedades químicas, esta sustancia presenta diversos problemas:

- Alta tensión superficial (no penetra adecuadamente).
- Propicia sustancias formadoras de sarro o incrustaciones.
- Capacidad para transportar suciedad.
- Desempeño de enjuague pobre.
- Ataca la superficie de la botella.
- No remueve suciedad inorgánica o lo hace en forma deficiente.



Sin embargo, todos estos inconvenientes se solucionan con la combinación de solución caustica y aditivos. Entonces en conjunto:

- Saponifica las grasas.
- hidroliza proteínas.
- solubiliza carbohidratos.

### 2.4.3. Concentración de aditivos

Un aditivo está diseñado para dar a la solución cáustica, mayor poder de limpieza y penetración sobre las superficies donde se aplicará el lavado. Debido a sus características de diseño el producto proporciona excelentes propiedades de secuestro, humectancia, detergencia y dispersión, además ayuda a: Disminuir la carbonatación de la sosa.

Los aditivos de lavado se combinan con iones de magnesio y calcio para formar complejos solubles y detener su deposición en forma de sales. Previenen la formación de sarro o incrustaciones, manchas u opacidad de la botella, y ayudan en la remoción de moho.

Los surfactantes es un elemento que actúa como detergente, emulsionante o humectante y que permite reducir la tensión superficial del líquido para la remoción o suspensión de sedimentos y/o desestabilización de espuma (colapso rápido de espuma) en la solución de lavado de botellas.

En el proceso de lavado, las botellas quedan bien limpias con los diferentes aditivos que existen en el mercado su componente principal es el ácido fosfórico del 1 al 2%; o bien el ácido amino trimetilenfosfonico al 2%, y en combinación con la solución de hidróxido de sodio ofrecen un lavado eficiente.

Las características de los aditivos son las siguientes:

- Mejoran el desempeño de la solución caustica.
- Son utilizados para limpiar botellas con suciedad de normal a crítica.
- Brinda humectación y un excelente brillo a la botella.
- Actúan como agentes quelantes o secuestrantes de sustancias químicas.
- Aportan un alto poder de limpieza, y permite obtener resultados satisfactorios en el lavado de botella con suciedad de tipo inorgánico como tierra y sales

**Aditivos Quelantes:** Tipos de aditivos que poseen la habilidad de formar complejos solubles de iones metálicos. Contiene dos o más sitios complejos capaces de coordinarse alrededor de los iones metálicos, de tal manera que no exhiban sus reacciones normales en presencia de agentes precipitantes.



Los aditivos quelantes generalmente son usados para combinarse con iones de calcio y magnesio para impedir que estos reaccionen con carbonatos, silicatos, oxalatos o ácidos de fermentación que estén en solución, de esta manera previenen la formación de sedimentos y depósitos calcáreos.

**Aditivos Dispersantes:** Los aditivos dispersantes poseen la habilidad de flocular y mantener las partículas de sucio en suspensión previniendo así su re-deposición. Los dispersantes son generalmente polímeros aniónicos los cuales son adsorbidos por el sucio impartándole entonces una fuerte carga negativa, cuando esto ocurre las partículas actúan como dos imanes de carga iguales, se repelen una a las otras originando el efecto de dispersión.

**Surfactantes:** Los aditivos surfactantes tienen la habilidad de reducir la tensión superficial de la solución de lavado, con lo cual se logra una mayor mojabilidad y penetración del agente detergente en la superficie sucia de las botellas.

**Antiespumantes:** Se utilizan para reducir la formación de espuma producto en su mayoría de la saponificación de las grasas contenidas en el sucio presente en las botellas. La espuma favorece el arrastre de la solución de lavado así como también disminuye significativamente la efectividad de lavado, debido a que genera un efecto amortiguante en la presión del lavado y en la energía cinética en los chorros de los inyectores.

#### 2.4.4. Temperatura de la solución caustica

En términos generales, todos los métodos de limpieza de botella funcionan en base a energía térmica, para actuar de manera efectiva y obtener un buen lavado. La energía térmica ayuda a ablandar o derretir la suciedad.

Temperaturas bajas generan mal lavado en las botellas, y temperaturas elevadas ataque excesivo al vidrio y a tintas de botellas pirograbadas, además que se puede presentar un empañamiento en la botella debido a un secado muy rápido de la solución alcalina en las zonas donde la botella no está inmersa.

Es necesario minimizar los cambios rápidos y drásticos de temperaturas entre tanques, ya que pueden romper las botellas. El diferencial de temperaturas de una etapa de la lavadora a otra no debe exceder en ningún momento los 15 grados celcius.

### 2.4.5. Niveles de los tanques

Niveles bajos en los tanques de solución caustica provocan

- Reducción del tiempo de contacto.
- Limpieza o ablandamiento pobre.
- Empañamiento de botella al secarse la solución caustica.

Niveles altos de solución caustica

- Arrastre de sosa caustica en los tanques posteriores.

### 2.4.6. Baja presión de pre enjuagues, enjuague final y chorros cáusticos

En términos generales, el método de limpieza y enjuague de botella funcionan en base a energía mecánica. Mediante el uso de bombas centrifugas, la energía mecánica contribuye a remover o ablandar suciedad.

En consecuencia, bajas presiones contribuyen a un mal lavado y presiones altas ayuda a eliminar residuales cáusticos, cualquier objeto pegado en la pared de la botella, o cualquier objeto extraño.

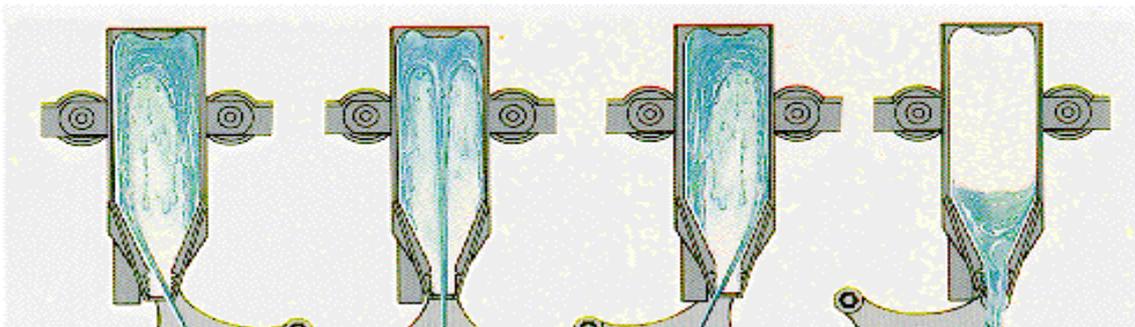


Figura 2.1 Proceso de enjuague de botella.

### 2.4.7. Botella con alto grado de contaminante (muy sucia)

Es botella que difícilmente va quedar esterilizada y lavada correctamente, pues necesitara un tratamiento adicional como es el lavado industrial.



Figura 2.2 Botella con suciedad extrema.

El lavado industrial es un proceso donde la botella es lavada y tallada mecánicamente con un cepillo y uso de detergentes.



Figura 2.3 Proceso del lavado industrial.

La inspección visual juega un papel muy importante, esta etapa es previa al proceso de lavado y tiene como finalidad que el inspector seleccione las botellas que serán las que va lavar nuestra máquina y retirar todas aquellas que no cumplen con el criterio y requieren un tratamiento adicional como es el lavado industrial.



Cómo se traten y almacenen las botellas vacías determina lo difíciles que son de limpiar.

Las botellas con un tráfico normal entre el comercio y la embotelladora son las más fáciles de lavar, mientras que las botellas vacías con residuos de producto que han estado almacenadas durante los meses de verano son las más difíciles de limpiar.

Un buen lavado dependerá de la condición de las botellas retornables.

#### 2.4.8. Cedazos y espreas de tubos rociadores tapadas por contaminantes.

Uno de los principales problemas durante la operación de la maquina son los cedazos obstruidos por residuos contaminantes, esto se debe a la gran cantidad de suciedad que es retirada en la primer parte del lavado, esta condición ocasiona una considerable disminución de presión provocando que la remoción de suciedad no sea la adecuada.



Figura 2.4 Cedazo tapado por residuos contaminantes.

Es importante tomar los factores anteriores para un adecuado proceso de lavado.



## 2.5. El proceso de lavado de botellas

Este proceso es sumamente interesante y complejo ya que pasa por varias subdivisiones, y se da de la siguiente manera:

- Al principio las botellas ingresan a la mesa de acumulación, los dedos auxiliares de empuje guían a las botellas para ser introducidas a los cangilones, estos son los recipientes que van a sostener las botellas para ser transportadas por todo el proceso.
- La primera etapa del proceso, sucede en el pre enjuague, en esta sección se rocían las botellas con agua caliente internamente como externamente, Aquí son eliminados los residuos y es hecha una limpieza preliminar con el objetivo de sacar la suciedad gruesa de las botellas para evitar que este pase a los baños de ablandamiento o remojo. El pre-rociamiento tiene también la importante función de pre-calentar el conjunto de botellas.

El estanque de pre-enjuague es constantemente abastecido con agua proveniente de la zona de enjuague final. Con esto, el agua de este estanque es renovada, no acumulando mucha suciedad y también manteniéndose caliente.

- En seguida las botellas entran en la zona de los baños de inmersión, con solución caustica, donde efectivamente ocurre la limpieza. Aquí se da el ablandamiento definitivo y la disolución de la suciedad de las botellas. Los azúcares son disueltos y las grasas emulsionadas. Los microorganismos son destruidos, garantizando la esterilización de la botella.
- Al salir las botellas del primer tanque de inmersión de sosa, las botellas ingresan a otra sección denominada lavado por chorro caustico, este lavado se realiza con ayuda de una placa perforada por la cual circula solución caustica a alta presión que es impulsada por una bomba centrífuga, aquí se realiza la limpieza de la botella por la parte interna.
- Finalizando el proceso de limpieza por inmersión y chorros cáusticos es necesario enfriar y enjuagar las botellas, las botellas se sumergen en un baño de agua, retirando la solución caustica de las botellas, este tanque se alimenta de agua limpia de los tanques de enjuague final por rebosamiento para evitar saturación de solución cáustica al enjuagar la botella en dicho tanque.
- A continuación, tenemos dos secciones de rociado compuesta por ocho tubos de rociado, se encargan de rociar una gran cantidad de agua a baja

presión, garantizando un buen enjuague tanto interno como externo en las botellas.

- Finalmente, las botellas llegan a la zona de enjuague final que es hecho por el rociado de agua tratada. Este conjunto se constituye por tres tubos de rociamiento móviles, que giran sobre su eje, acompañando el bocal de las botellas por un tiempo. Este conjunto es accionado directamente por la cadena principal, garantizando el perfecto sincronismo del sistema. El rociamiento de agua fresca actúa solamente en el interior de las botellas, para garantizar la completa eliminación de los residuos cáusticos. El perfecto funcionamiento de este conjunto garantiza la limpieza total y también una temperatura de salida de las botellas semejante a su temperatura de entrada.

El objetivo de la última etapa es que la botella salga limpia y sin residuos de contaminante y esté lista para pasar al siguiente proceso.

El diseño y operación de una lavadora de botellas debe remover toda la suciedad y materia extraña del interior y exterior de los envases, eliminando levaduras, hongos y bacterias patógenas y no patógenas, produciendo así envases estériles y libres de detergentes residuales.

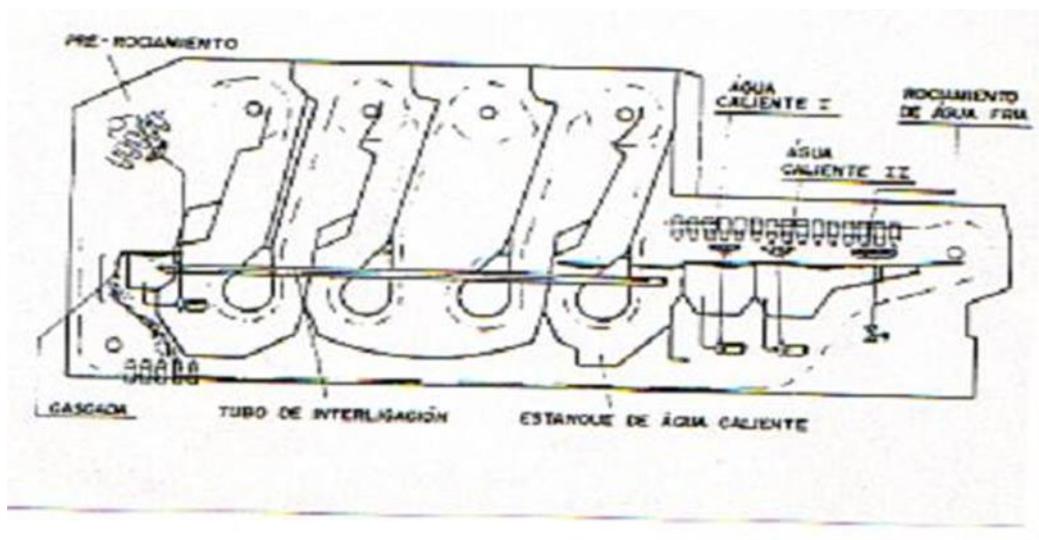


Figura 2.5 Imagen de una lavadora industrial.



## CAPÍTULO 3 CONCEPTOS BÁSICOS DE CONTROL AUTOMÁTICO DE PROCESOS

El propósito principal de este capítulo es demostrar la necesidad del control automático de procesos y a su vez definir la terminología básica para poder aplicar el control automático de la lavadora y lograr así la propuesta de mejora.

El objetivo del control automático de procesos es mantener en determinado valor de operación, las variables del proceso tales como: temperaturas, presiones, flujos.

Los procesos son de naturaleza dinámica, en ellos siempre ocurren cambios y si no se emprenden las acciones pertinentes, a las variables del proceso, afectarían directamente, la calidad del producto.

En este capítulo se presenta una breve descripción de algunas arquitecturas de sistemas de control, y algunos de sus componentes.

Los procesos exigen el control y son muy variados y abarcan muchos tipos de productos: fabricación de derivados del petróleo, productos alimenticios, la industria cerámica, las centrales generadoras de energía, la siderurgia, los tratamientos térmicos, la industria papelera, la industria textil, etc.

En todos estos procesos es absolutamente necesario controlar y mantener constantes algunas magnitudes, tales como la presión, el caudal, el nivel, la temperatura, el pH, la conductividad, la velocidad, la humedad, el punto de rocío, etcétera.

Los instrumentos de medición y control permiten mantener y regular las variables de proceso en condiciones más idóneas que las que el propio operador podría realizar.



### 3.1 Elementos del sistema de control

Todo sistema de control tiene elementos básicos que lo componen, en el diagrama de bloques de la figura 3.0 se muestran los componentes básicos de un sistema de control.

SET POINT

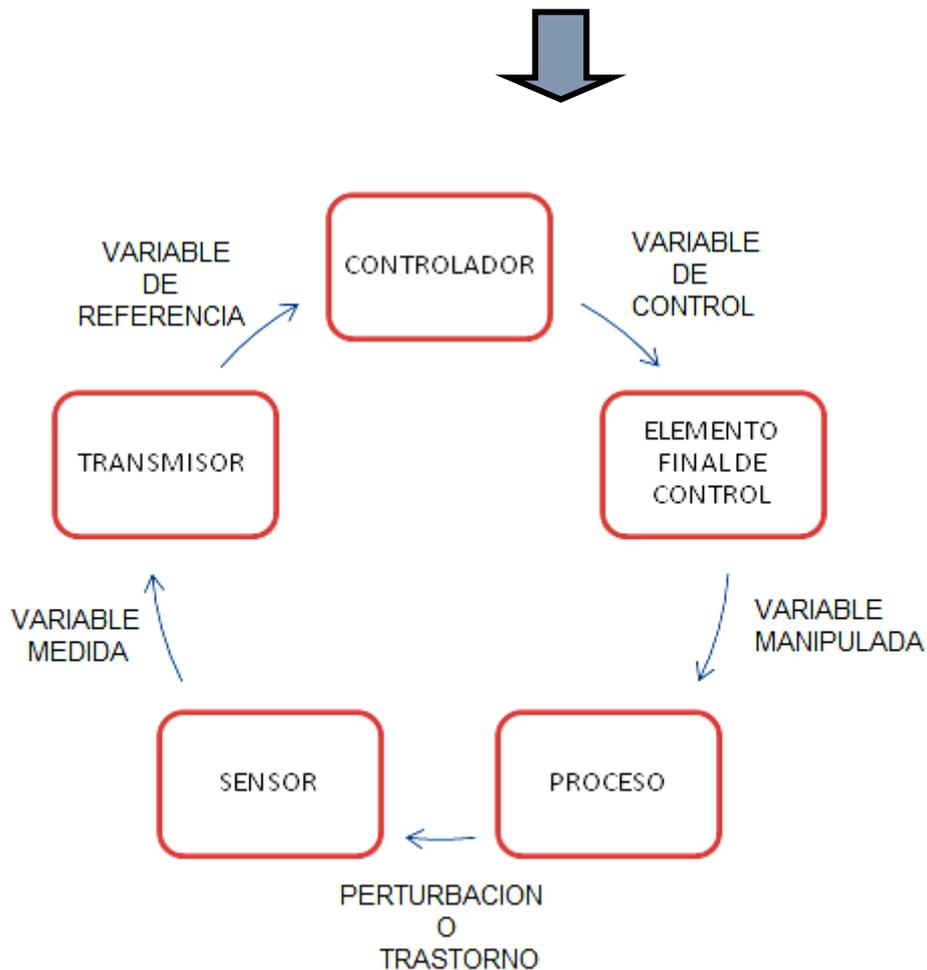


Figura 3.0 Diagrama de flujo de control de proceso.



A continuación, se describen componentes básicos de cualquier sistema de control en lazo cerrado los cuales son:

- Set-point ó punto de control: es el valor que se desea tenga la variable controlada.
- Variable controlada: es la variable que se debe mantener o controlar dentro de un valor deseado.
- Variable manipulada: es la variable que se utiliza para mantener la variable controlada en el punto de control.
- Perturbación o trastorno: cualquier variable que ocasiona que la variable de control se salga del punto de control.
- Variable medida: es la señal que indica el estado y el valor de la señal de salida.
- Variable de referencia ó retroalimentada: es la señal que entra directamente al controlador por lo que es normalizada, ajustada, etc.
- Controlador: Dispositivo que funciona de manera automática, mediante algún algoritmo establecido, para regular una variable controlada. La entrada del controlador recibe información acerca del estado de la variable de proceso y a continuación emite una señal de salida adecuada al elemento de control final; Se ejerce una acción correctiva de acuerdo con la desviación.
- Elemento final de control: Dispositivo que implementa la estrategia de control determinada por la salida de un controlador. Recibe la señal del controlador y modifica el agente de control. El elemento final de control puede adoptar muchas formas, el más habitual en la industria actual es el conjunto de válvula de control. Las válvulas de control modulan el fluido del flujo (gas, vapor, agua, compuestos químicos, etc.)
- Sensor ó elemento primario: dispositivo que detecta el valor de la variable de proceso y suministra la señal de salida correspondiente a un transmisor. El sensor puede estar integrado en el transmisor o ser un componente.
- Transmisor: Dispositivo que detecta el valor de la variable de proceso y transmite la señal de salida correspondiente al controlador para la comparación con el punto de ajuste.



La importancia de estos componentes estriba en que realizan las tres operaciones básicas que deben estar presentes en todo sistema de control, estas operaciones son:

- Medición (M): la medición de la variable que se controla se hace generalmente mediante la combinación de sensor y transmisor.
- Decisión (D): con base en la medición, el controlador decide que hacer para mantener la variable en el valor que se desea.
- Acción (A): como resultado de la decisión del controlador se debe efectuar una acción en el sistema, generalmente ésta es realizada por el elemento final de control.

Como se dijo, estas tres operaciones, M, D y A son obligatorias para todo sistema de control. En algunos sistemas, la toma de decisión es sencilla, mientras que en otros es más compleja; por lo que al realizar el diseño de un sistema de control primero hay que asegurarse que las acciones que se emprendan tengan su efecto en la variable controlada, es decir, que la acción emprendida repercuta en el valor que se mide; de lo contrario el sistema no controla y puede ocasionar más perjuicio que beneficio.

Sistemas de control de lazo abierto: un sistema de lazo abierto es aquél donde la salida no tiene efecto sobre la acción de control. En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada. Así, a cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fija; como resultado de ello, la precisión del sistema depende de la calibración.

Estos sistemas se caracterizan por:

- Ser sencillos y de fácil concepto.
- Nada asegura su estabilidad ante una perturbación.
- Ser afectados por las perturbaciones; Éstas pueden ser tangibles o intangibles.

Sistema de control de lazo cerrado: estos sistemas también se conocen como sistemas de control realimentados. En un sistema de este tipo, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación, con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado.

Sus características son:

- Ser complejos, pero amplios en cantidad de parámetros.
- La salida se compara con la entrada y le afecta para el control del sistema.
- Su propiedad de retroalimentación.
- Ser más estable a perturbaciones y variaciones internas.



El control en lazo cerrado es imprescindible cuando se da alguna de las siguientes circunstancias:

- Cuando un proceso no es posible de regular por el hombre.
- Una producción a gran escala que exige grandes instalaciones y el hombre no es capaz de manejar.
- Vigilar un proceso es especialmente duro en algunos casos y requiere una atención enorme que el hombre puede perder fácilmente por cansancio o descuido, con los consiguientes riesgos que ello pueda ocasionar al trabajador y al proceso.

### 3.2 Sistema de control de procesos

Control de procesos, tiene como objetivo mantener una variable controlada en presencia de perturbaciones, operación que se denomina regulación. La solución sólo es concebible si se dispone de información correcta en los instantes oportunos. Esa información debe captarse mediante sensores, realimentarse hacia las unidades o centros de control (controladores) y procesarse allí a los efectos de la emisión de órdenes o señales a través de dispositivos llamados actuadores, cuya función es corregir sobre la marcha los procesos sometidos a control.

Considérese un intercambiador de calor en el cual la corriente en proceso se calienta mediante vapor de condensación, como se ilustra en la figura 3.1, el propósito de la unidad es calentar el fluido que se procesa, de una temperatura dada de entrada  $T_i(t)$ , a cierta temperatura de salida,  $T(t)$ , que se desea. Como se dijo, el medio de calentamiento es vapor de condensación y la energía que gana el fluido en proceso es igual al calor que libera el vapor, siempre y cuando no haya pérdidas de calor en el entorno, esto es, el intercambiador de calor y la tubería tienen un aislamiento perfecto; en este caso, el calor que se libera es el calor latente en la condensación del vapor. En este proceso existen muchas variables que pueden cambiar, lo cual ocasiona que la temperatura de salida se desvíe del valor deseado, si esto llega a suceder, se deben emprender algunas acciones para corregir la desviación; esto es, el objetivo es controlar la temperatura de salida del proceso para mantenerla en el valor que se desea.

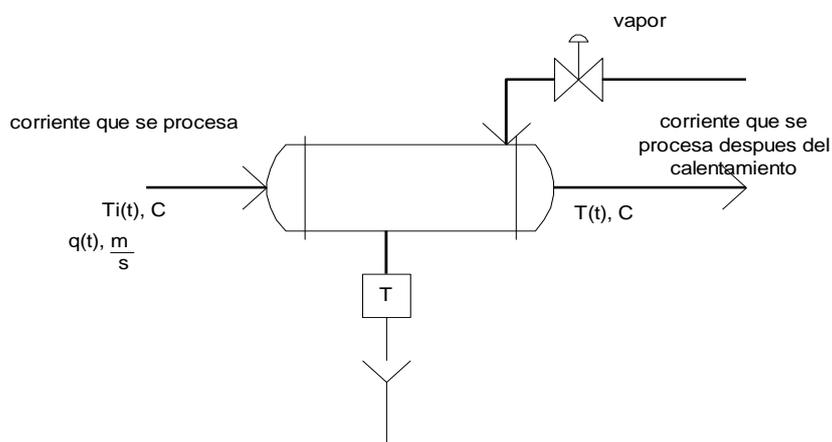


Figura 3.1 Intercambiador de calor.

Una manera de lograr este objetivo es primero, medir la temperatura  $T(t)$ , después comparar ésta con el valor que se desea y, con base en la comparación, decidir qué se debe hacer para corregir cualquier desviación. Se puede usar el flujo del vapor para corregir la desviación, es decir, si la temperatura está por arriba del valor deseado, entonces se puede cerrar la válvula de vapor para cortar el flujo del mismo (energía) hacia el intercambiador de calor. Si la temperatura está por abajo del valor que se desea, entonces se puede abrir un poco más la válvula de vapor para aumentar el flujo de vapor (energía) hacia el intercambiador.

Todo esto lo puede hacer manualmente el operador y puesto que el proceso es bastante sencillo no debe representar ningún problema. Sin embargo, en la mayoría de las plantas de proceso existen cientos de variables que se deben mantener en algún valor determinado y con este procedimiento de corrección se requeriría una cantidad tremenda de operarios, por ello, sería preferible realizar el control de manera automática, es decir, contar con instrumentos que controlen las variables sin necesidad de que intervenga el operador. Esto es lo que significa el control automático de proceso. Para lograr este objetivo se debe diseñar e implementar un sistema de control.

En la figura 3.0 se muestra un sistema de control y sus componentes básicos.

El primer paso es medir la temperatura de salida de la corriente del proceso, esto se hace mediante un sensor (termopar, dispositivo de resistencia térmica, termómetros de sistema lleno, termistores, etc.). El sensor se conecta físicamente al transmisor, el cual capta la salida del sensor y la convierte en una señal lo suficientemente intensa como para transmitirla al controlador. El controlador recibe la señal, que está en relación con la temperatura, la compara con el valor que se desea y, según el resultado de la comparación, decide qué hacer para mantener la temperatura en el valor deseado. Con base en la decisión, el controlador envía otra señal al elemento final de control, el cual, a su vez, maneja el flujo de vapor.

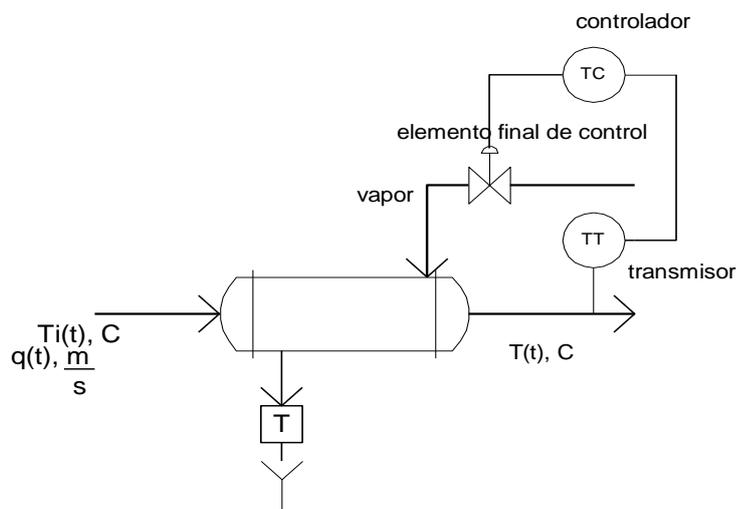


Figura 3.2 Sistema del control de intercambiador de calor.



### 3.2.1 Conceptos de instrumentación

Ya definidos los conceptos básicos de control ahora es necesario conocer terminología básica de instrumentación.

Los instrumentos de medición y de control son relativamente complejos y su función puede comprenderse bien si están incluidos dentro de una clasificación adecuada. Como es lógico, pueden existir varias formas para clasificar los instrumentos, cada una de ellas con sus propias ventajas y limitaciones. Se considerarán dos clasificaciones básicas:

La primera relacionada con la función del instrumento y la segunda con la variable del proceso. En este caso se tratará la clasificación en función del instrumento:

De acuerdo con la función del instrumento, obtenemos las formas siguientes:

- Instrumentos ciegos: son aquellos que no tienen indicación visible de la variable; Hay que hacer notar que son ciegos los instrumentos de alarma, tales como presostatos, termostatos (interruptores de presión y temperatura respectivamente), que poseen una escala exterior con un índice de selección de la variable, ya que sólo ajustan el punto de disparo del interruptor o conmutador al cruzar el valor seleccionado. Son también instrumentos ciegos, los transmisores de caudal, presión, nivel y temperatura sin indicación.
- Los instrumentos indicadores disponen de una pantalla o display en la que puede leerse el valor de la variable.

Los instrumentos registradores registran con trazo continuo o a puntos la variable, y pueden ser circulares o de gráfico rectangular o alargado según sea la forma del gráfico. También existen registradores digitales que guardan sus registros en una memoria interna.

Los elementos primarios están en contacto con la variable y utilizan o absorben energía del medio controlado para dar al sistema de medición una indicación en respuesta a la variación de la variable controlada. El efecto producido por el elemento primario puede ser un cambio de presión, fuerza, posición, medida eléctrica, etc. Por ejemplo: en los elementos primarios de temperatura de bulbo y capilar, el efecto es la variación de presión del fluido que los llena y en los de termopar se presenta una variación de fuerza electromotriz.

Los *transmisores* captan la variable de proceso a través del elemento primario y la transmiten a distancia en forma de señal neumática de margen 3 a 15 psi (libras por pulgada cuadrada) o electrónica de 4 a 20 mA de corriente continua, de 0 a 10 V cc o de algún otro tipo. La señal digital utilizada en algunos transmisores inteligentes es apta directamente para ordenador.

El elemento primario puede formar o no parte integral del transmisor; el primer caso lo constituye un transmisor de temperatura de bulbo y capilar y el segundo un transmisor de caudal con la placa orificio como elemento primario. Los



*transductores* reciben una señal de entrada en función de una o más cantidades físicas y la convierten modificada o no a una señal de salida. Son transductores, un relé, un elemento primario, un transmisor, un convertidor PP / I (presión de proceso a intensidad), un convertidor PP / P (presión de proceso a señal neumática), etc. Los *convertidores* son aparatos que reciben una señal de entrada neumática (3-15 psi) o electrónica (4-20 mA c.c.) procedente de un instrumento y después de modificarla envían la resultante en forma de señal de salida estándar.

### 3.3 Instrumentación en la industria de bebidas

Como se pudo ver previamente en este capítulo la instrumentación y el control automático son herramientas imprescindibles en cualquier proceso químico, incluido el de elaboración de bebidas, la industria ha ido creciendo con el paso de los años y ha sido cada vez más necesario un control más eficiente, por lo tanto, se requiere de instrumentos más sofisticados y mejor seleccionados.

El proceso de lavado es largo y complejo, (previamente mencionado en el capítulo 2), y existen muchas variables que intervienen, tales como:

- Tiempo de contacto.
- Concentraciones de la solución caustica.
- Concentración de aditivo.
- Temperatura de la solución caustica.
- Niveles de los tanques.
- Baja presión de pre enjuagues, enjuague final y chorros cáusticos.
- Botella con alto grado de contaminante muy sucia.
- Cedazos y espreas de tubos rociadores tapadas por contaminantes.

De las variables que existen en el proceso la única que no podemos controlar es botella con alto grado de contaminante muy sucia, esta botella dependerá del criterio de cada inspector en la selección, es una variable que cambia y depende del estado de la botella, las variables que si se pueden controlar es temperatura de la solución caustica, concentración de sosa y aditivo, tiempo de contacto, niveles de los tanques dentro de la primera etapa de la lavadora se puede acelerar o retardar la velocidad.

Para efectos de este trabajo solo se mencionan algunas variables a controlar para mejorar el desempeño del lavado de envase, ya que es en la parte que se centra el trabajo, las cuales son: temperatura, presión, flujo y otro factor que interviene en el proceso la selección por parte del personal.



### 3.3.1 Medida de temperatura

La medida de temperatura constituye una de las mediciones más comunes e importantes que se efectúan en los procesos industriales. Las limitaciones de medida del sistema quedan definidas en cada tipo de aplicación por la precisión, por la velocidad de captación de la temperatura, por la distancia entre el aparato de medida y el receptor, y por el tipo de instrumento indicador, registrador, controlador necesarios; cabe mencionar que es necesaria una comprensión clara de los métodos de medida con sus ventajas y desventajas propias, para lograr una selección óptima del sistema más adecuado.

Los instrumentos de temperatura utilizan diversos fenómenos que son influidos por la temperatura entre los que figuran:

- Variaciones en volumen o en estado de los cuerpos (sólidos, líquidos o gases).
- Variación de resistencia de un conductor (sondas de resistencia).
- Variación de resistencia de un semiconductor (termistores).
- FEM creada en la unión de dos metales distintos (termopares).
- Intensidad de la radiación total emitida por el cuerpo (pirómetro de radiación).
- Otros fenómenos utilizados en el laboratorio (velocidad del sonido en un gas, resonancia de un cristal, etc.).

De este modo se emplean algunos de los instrumentos siguientes:

Termómetro de vidrio, termómetro bimetálico, elementos primarios de bulbo y capilar rellenos de líquido, gas o vapor, termopares, pirómetros de radiación, termómetros de resistencia, termómetros ultrasónicos, de cristal de cuarzo, etc.

Como se puede ver existen muchos métodos para la medición de la temperatura, pero en este caso solo se podrán describir los termopares y los RTD's (detector resistivo de temperatura).

### 3.3.2 Termopares

El termopar se basa en un efecto descubierto por Seebeck en 1821, de la circulación de una corriente en un circuito formado por dos metales diferentes cuyas uniones (unión de medida o caliente, y unión de referencia o fría), se mantienen a distinta temperatura, como muestra la figura 3.3.

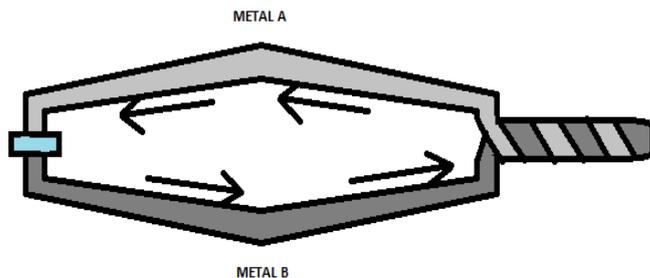


Figura 3.3 Termopar.

Esta circulación de corriente obedece a 2 efectos termoeléctricos combinados, el efecto Peltier, que provoca la liberación o absorción de calor en la unión de dos metales distintos, cuando una corriente circula a través de la unión y el efecto Thompson, que consiste en la liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperaturas.

### 3.3.3 Detector resistivo de temperatura (RTD)

La medida de temperatura utilizando sondas de resistencia depende de las características de resistencia en función de la temperatura que son propias del elemento de detección.

El elemento consiste usualmente en un arrollamiento de hilo muy fino del conductor adecuado bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o cerámica.

El material que forma el conductor se caracteriza por el llamado “coeficiente de temperatura de resistencia” que expresa una temperatura especificada, la variación de la resistencia en ohmios del conductor por cada grado que cambia la temperatura. La relación entre estos factores puede verse en la ecuación (4):

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t) \dots \dots \dots (4)$$

En la que:

$R_0$  = resistencia en ohmios a 0°C

$R_t$  = resistencia en ohmios a t° C

$\alpha$  = coeficiente de la temperatura de la resistencia cuyo valor entre 0 y 100°C es de  $0.003850 \Omega^* \Omega^{-1} * ^\circ C^{-1}$  en la escala practica de temperaturas internacional.



En la tabla 3.0 se muestran las características de algunas sondas de resistencia.

Metal	Resistividad $m\Omega/cm$	Coef. De temp. $\Omega/\Omega^{\circ}C$	Intervalo útil de temp. $^{\circ}C$	$\phi$ min . De hilo mm	Costo relativo	Resis. Sonda a a $0^{\circ}C$ , ohms	Precisión $^{\circ}C$
Platino	9.83	0.00385	-200 a 950	0.05	Alto	25, 100, 130	0.01
Níquel	6.38	0.0063 a 0.0066	-150 a 300	0.05	Medio	100	0.50
Cobre	1.56	0.00425	-200 a 120	0.05	Bajo	10	0.10

Tabla 3.0 Resistencia de RTD's.

El platino es el material más adecuado para los RTD's si de precisión y estabilidad se trata, pero su principal inconveniente es el costo. En general la sonda de platino utilizada en la industria tiene una resistencia de  $1000\Omega$  a  $0^{\circ}C$ .

El níquel es más barato que el platino y posee una resistencia más elevada con una mayor variación por grado, sin embargo, tiene como desventaja la falta de linealidad en su relación resistencia-temperatura y las variaciones que experimenta su coeficiente de resistencia según los lotes fabricados. El cobre tiene una resistencia de variación uniforme y es estable y barato, pero tiene una baja resistividad

Las bobinas que llevan arrollado el hilo de resistencia están encapsuladas y situadas dentro de un tubo de protección o vaina de material adecuado al fluido del proceso (acero, acero inoxidable 304, acero inoxidable 316, hastelloy, monel, etc.) en la figura 3.4 se muestran varios tipos de sonda.

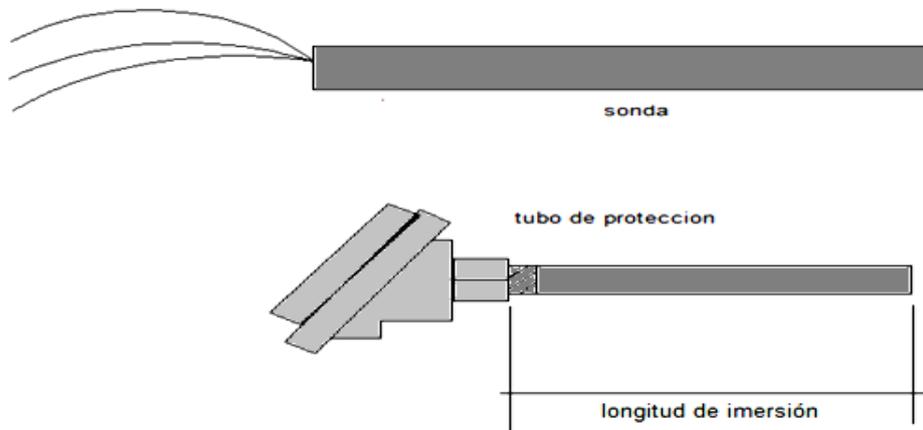


Figura 3.4 Tipos de sondas.

La variación de resistencia de la sonda es medida con un puente de Wheatstone dispuesto en montajes denominados de 2 hilos, de 3 hilos o de cuatro hilos, según sean los hilos de conexión de la sonda de resistencia al puente. En la figura 3.5 pueden verse diferentes tipos de montaje.

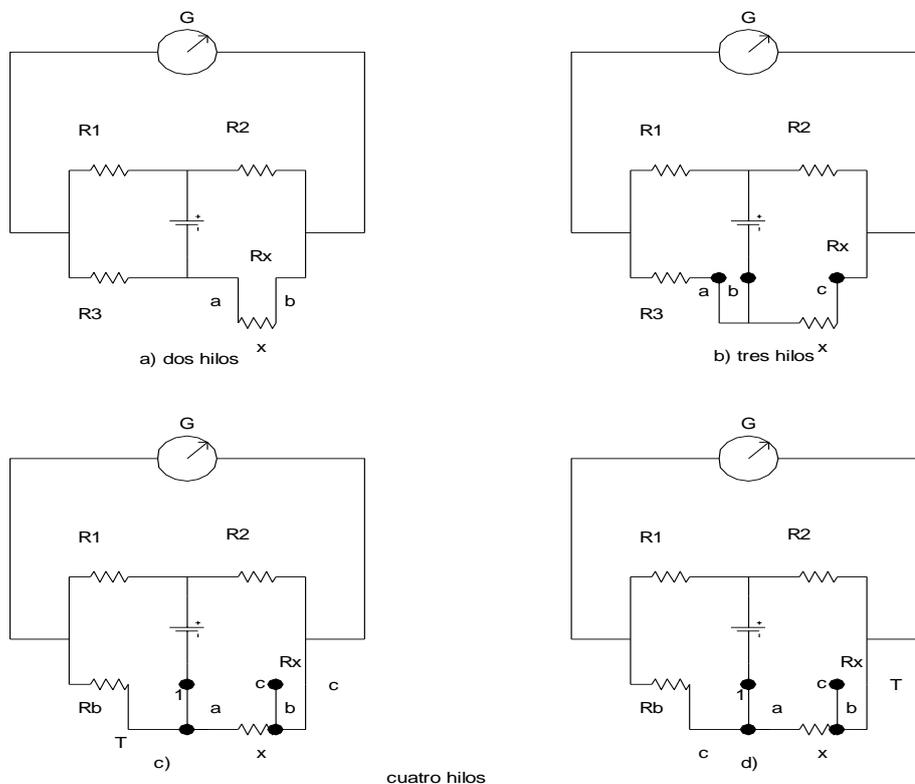


Figura 3.5 Conexiones de RTD'S.



En el montaje de 2 hilos (3.5a) la resistencia se conecta a uno de los brazos del puente y se varía  $R_3$  hasta que se elimina la desviación en la medición, en este momento se cumple con la ecuación (5):

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{x} \dots\dots\dots (5)$$

De aquí tenemos que:

$$X = \left( R_3 \frac{R_2}{R_1} \right) \dots\dots\dots (6)$$

Este es el montaje más sencillo, pero presenta el inconveniente de que la resistencia de los hilos  $a$  y  $b$  de conexión de la sonda al puente varia cuando cambia la temperatura, y esta falsea por lo tanto la indicación; aunque estos hilos sean de baja resistencia y esta sea conocida, las longitudes que puede haber en campo entre la sonda y el panel de esté el instrumento receptor, añaden una cierta resistencia al brazo de la sonda. Y el efecto de la ecuación anterior pasa a:

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{x+K(a+b)} \dots\dots\dots (7)$$

Donde:

- $x$ = valor de resistencia desconocida
- $K$ = coeficiente de resistencia por unidad de longitud
- $a$  y  $b$ = longitud de los cables  $a$  y  $b$  de la sonda al puente

El montaje de dos hilos se emplea, pues, con resistencias moderadas del hilo de conexión y cuando la lectura no necesita ser demasiado exacta.

El montaje de tres hilos (figura 3.5b), es el más utilizado en la práctica. En este circuito la sonda está conectada mediante tres hilos al puente. De este modo, la medida no es afectada por la longitud de los conductores ni por la temperatura, ya que esta influye a la vez en dos brazos adyacentes al puente, siendo la única condición que la resistencia de los hilos  $a$  y  $b$  sea exactamente la misma.

En efecto, en la figura puede verse que la ecuación correspondiente es:

$$\frac{R_1}{R_3+Ka} = \frac{R_2}{x+Kb} \dots\dots\dots (8)$$

Como  $Ka = Kb$ , y haciendo  $R_2/R_1=1$ ,  $R_3$  puede ajustarse a un valor igual a  $x$ .



El montaje de cuatro hilos (fig. 3.5c y d) se utiliza para obtener la mayor precisión posible en la medida, como es el caso de calibración de patrones de resistencia en laboratorio. Se basa en efectuar dos mediciones de resistencia de la sonda combinando de modo tal, que la sonda pase de un brazo del puente al adyacente. De este modo se compensan las resistencias desiguales de los hilos de conexión y el valor de la resistencia equivale al promedio de los valores determinados en las dos mediciones.

### 3.3.4 Medida de presión

La presión se define como la fuerza aplicada por unidad de superficie y puede explicarse en unidades tales como: pascales, atmosferas, bar, kilogramo por centímetro cuadrado, psi. En el SI (sistema internacional de unidades) esta estandarizada como pascales. El pascal es igual a 1 newton por metro cuadrado ( $1\text{N/m}^2$ ), siendo un newton la fuerza aplicada a un cuerpo de 1Kg de masa para que tenga una aceleración de  $1\text{m/s}^2$ . Como el pascal es una unidad muy pequeña se emplean también los kilos pascales (KPa), el mega pascal (MPa) y la giga pascal (GPa). En la industria es también muy utilizado el Bar, y el  $\text{Kg/cm}^2$ , siendo esta última una unidad cada vez más en desuso.

### 3.3.5 Presión absoluta

Los diferentes tipos de presión se diferencian solamente por la presión de referencia cero. La falta de presión (vacío total) es un espacio cualquiera en el universo que se conoce como cero absolutos.

Si una presión esta referenciada al cero absoluto se conoce como *presión absoluta*. Para distinguirla de otros tipos de presión se caracteriza por el sufijo o subíndice *abs*. Otra forma de conocer la presión absoluta es sumando la presión atmosférica a la presión relativa que indica cualquier manómetro.

### 3.3.6 Presión atmosférica

La presión necesaria para la vida en la tierra se conoce como presión atmosférica del aire. Se ocasiona por el peso de la atmosfera que rodea la tierra hasta una altitud aproximada de 500Km, es decir, presión absoluta cero. Para distinguirla de otros tipos de presión se caracteriza por el sufijo o subíndice atm.

La presión atmosférica depende de los cambios climáticos tomándose como referencia la existente como valor medio a nivel del mar, denominado atmosfera o lo que es igual 1.013Bar, o 760mmHg. Los cambios climáticos pueden hacer aumentar o disminuir la presión atmosférica en un +/- 5%.



### 3.3.7 Presión diferencial

La diferencia entre dos presiones  $P_1$  y  $P_2$  se conoce como presión diferencial. Es decir

$$dp = P_1 - P_2 \dots \dots \dots (9)$$

Cuando se mide la diferencia de presión entre dos puntos, habitualmente con el mismo cero de referencia, la medida se denomina  $P_{1,2}$  o también  $dp_{1,2}$ .

### 3.3.8 Presión relativa

En la práctica se suele utilizar como medida de presión la diferencia entre la presión atmosférica y la presión absoluta. Esta diferencia se conoce como presión relativa. Para distinguirla de los otros tipos de presión se caracteriza por el sufijo rel.

$$P_{rel} = P_{abs} - P_{at} \dots \dots \dots (10)$$

Cuando la presión absoluta es mayor que la atmosférica, la presión relativa es de signo positivo, por el contrario, si la presión absoluta es menor que la atmosférica, la presión relativa es de signo negativo. En otras palabras la presión relativa puede ser positiva o negativa respecto a la presión atmosférica.

La presión relativa de signo negativo a veces se conoce como presión de vacío, por ejemplo, 500mm Hg de vacío es un valor de presión relativa negativa. Este valor es equivalente a 260mm Hg de presión absoluta, suponiendo que la presión atmosférica es de 760mm Hg. En concreto la presión absoluta está referida siempre al vacío o cero absolutos, mientras que la presión relativa está siempre referida a la presión atmosférica.

Existen muchos métodos de medición de presión diferencial, que son los elementos mecánicos de medida directa como el barómetro, manómetro, etc.

Están también los electromagnéticos, como son resistivos, magnéticos, piezoeléctricos, de ionización, etc. Como se puede observar existe una amplia gama de medidores de presión pero en este caso solo será mencionado el método capacitivo.

### 3.3.9 Medidores de presión capacitivos

Se basan en la variación de capacidad que se produce en un condensador al desplazarse una de sus placas por la aplicación de presión. La placa móvil tiene forma de diafragma y se encuentra situada entre dos placas fijas. De este modo se tienen dos condensadores uno de capacidad fija o de referencia y el otro de capacidad variable, que pueden compararse en circuitos oscilantes o bien en circuitos de puentes de Wheatstone alimentados por corriente alterna. Los transductores capacitivos se caracterizan por su pequeño tamaño y su construcción robusta, tienen un pequeño desplazamiento volumétrico y son adecuados para medidas estáticas y dinámicas. Su señal de salida es débil por lo que precisan de amplificadores con el riesgo de introducir errores en la medición. Son sensibles a la variación de temperatura y a las aceleraciones transversales y precisan de un ajuste de los circuitos oscilantes y de los puentes de C.A. a los que están acoplados.

Su intervalo de mediada es relativamente amplio entre 0.05-5 a 0.05-600 bar y su precisión es del orden de  $\pm 0.2\%$  a  $\pm 0.5\%$ .

La figura 3.6 muestra el elemento primario de un medidor capacitivo cerámico.

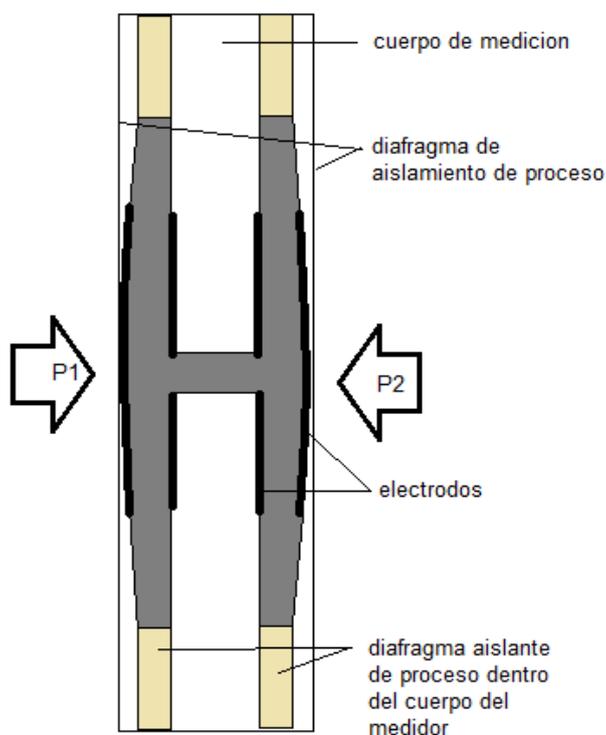


Figura 3.6 Elemento primario capacitivo.

La célula de medición cerámica se basa en el principio de un condensador de placas con un electrodo en un cuerpo del medidor y un electrodo móvil en el interior de la membrana. El aceite de silicona o aceite mineral que se utilizan como aceites de llenado para esta celda de medida son aceites estándar.

Una presión diferencial ( $P_1 \neq p_2$ ) provoca una deflexión correspondiente de ambos diafragmas. Ambos valores de capacitancia se convierten y son alimentados al microprocesador del transmisor como una señal digital.

### 3.3.10 Medidores de presión resistivos

Constituyen sin duda uno de los transductores eléctricos más sencillos. Consiste en un elemento elástico (tubo Bourdon o capsula) que varía la resistencia óhmica de un potenciómetro en función de la presión. El potenciómetro puede adoptar la forma de un solo hilo continuo o bien estar arrollado en una bobina siguiendo un valor lineal o no de resistencia. Existen varios tipos de potenciómetros según sea el tipo de resistencias: potenciómetros de grafito, de resistencia bobinada, de película metálica y de plástico moldeado. En la figura 3.7 se muestra un transductor resistivo representativo que consta de un muelle de referencia, el elemento de presión y un potenciómetro de precisión. El muelle de referencia es el corazón del transductor, ya que su desviación al comprimirse debe ser únicamente una función de la presión y además debe ser independiente de la temperatura, de la aceleración y de cualquier otro factor de ambientes externos.

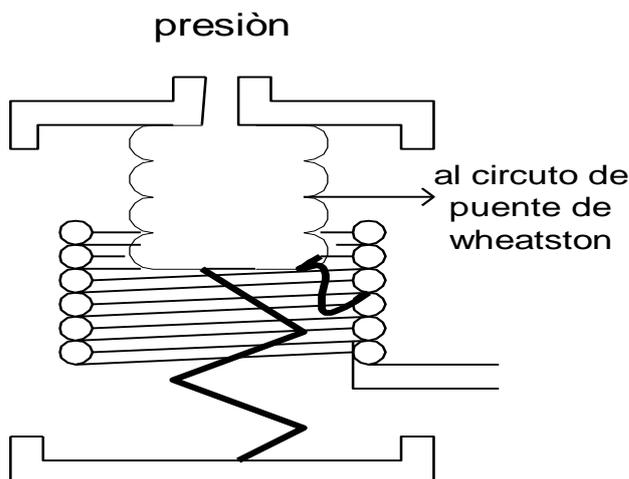


Figura 3.7 Transductor resistivo.

El movimiento del elemento de presión se transmite a un brazo móvil aislado que se apoya sobre el potenciómetro de precisión. Éste está conectado a un circuito de puente de Wheatstone.



Los transductores resistivos son simples y su señal de salida bastante potente como para proporcionar una corriente de salida suficiente para el funcionamiento de los instrumentos de indicación sin necesidad de amplificación. Sin embargo, son insensibles a pequeños movimientos del contacto del cursor, muy sensibles a vibración y presentan una estabilidad pobre en el tiempo.

El intervalo de medida de estos transmisores corresponde al elemento de presión que utilizan (tubo Bourdon, fuelle, etc.) y varía en general de 0-0.1 a 0-300Kg/cm<sup>2</sup>. La precisión es del orden del 1-2%.

### 3.3.11 Medida de flujo

La medición de flujo ó caudal se utiliza en la industria para dos cosas fundamentales:

- Contabilidad.
- Control de procesos.

Desde el primer punto de vista, los medidores de flujo se utilizan para contabilizar la transferencia de materia entre diversas partes del proceso, diferentes compañías, o bien entre suministrador y usuario.

En cuanto a control de procesos, la medición de flujo es imprescindible para poder realizar control automático, así como para optimizar rendimientos de las unidades de producción aplicando balances de materia. Por esta causa los flujos deben medirse controlarse cuidadosamente.

Existen diversos tipos de medidores de flujo los cuales de los cuales algunos son:

- Medidores de área variable.
- Medidores de desplazamiento positivo.
- Medidores másicos y de presión diferencial.
- Medidores electromagnéticos.
- Medidores de turbina.

### 3.3.12 Medidor electromagnético de caudal

La ley de Faraday establece que cualquier tensión inducida a través de cualquier conductor, al moverse este perpendicularmente, a través de un campo magnético, es proporcional a la velocidad del conductor.

En el medidor magnético de caudal el conductor es el líquido y la señal generada es  $E_s$ , esta señal es captada por dos electrodos rasantes a la superficie interior del tubo y diametralmente opuestos la figura 3.8 muestra el medidor.

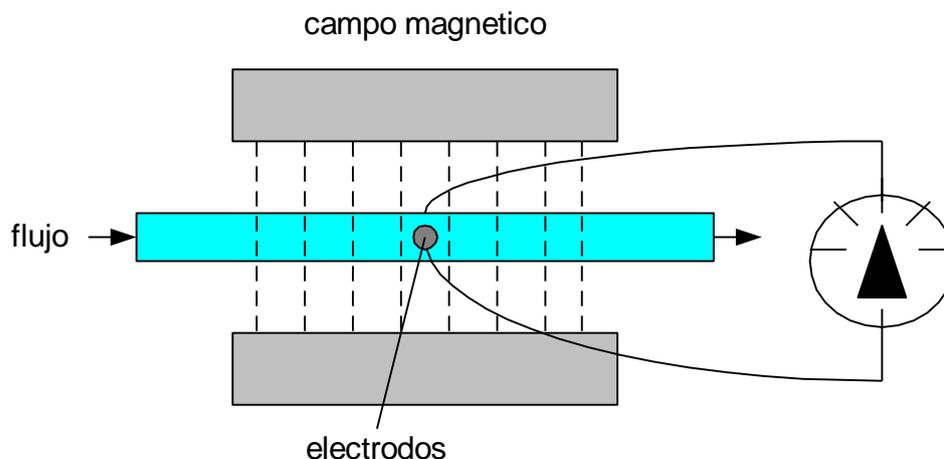


Figura 3.8 Principio de funcionamiento del medidor electromagnético.

Realmente la única zona del líquido en movimiento que contribuye a la FEM es la que une en línea recta a los electrodos,  $B$  es la densidad del flujo magnético creado por la bobina de campo,  $l$  es el diámetro de la tubería y  $v$  es la velocidad del fluido a través del medidor. Como:

$$Q = v \frac{\pi D^2}{4} \text{ Resulta que: } Q = K \frac{E_s}{B} D \dots\dots\dots (11)$$

Las formulas anteriores indican que  $E_s$  depende, no solo de la velocidad del flujo sino también de la densidad del flujo magnético  $B$ , lo cual a su vez está influida por la tensión de línea y la temperatura del fluido. Es obvio que para obtener una señal que dependa únicamente de la velocidad deben eliminarse la influencia de estos tres factores y, por otro lado, es muy difícil mantenerlos en valores constantes. De aquí que la señal de salida de voltaje del medidor se compara en el receptor con otra tensión denominada tensión de referencia  $E_r$ . Como las dos señales derivan a la vez del campo magnético  $B$ , la tensión de línea y las variaciones de temperatura y conductividad no influyen en la precisión de la medida. La señal de referencia  $E_r$  se toma de un arrollamiento colocado en los

bobinados del campo que genera el flujo magnético. En la figura 3.8a se observa las conexiones del elemento de medida.

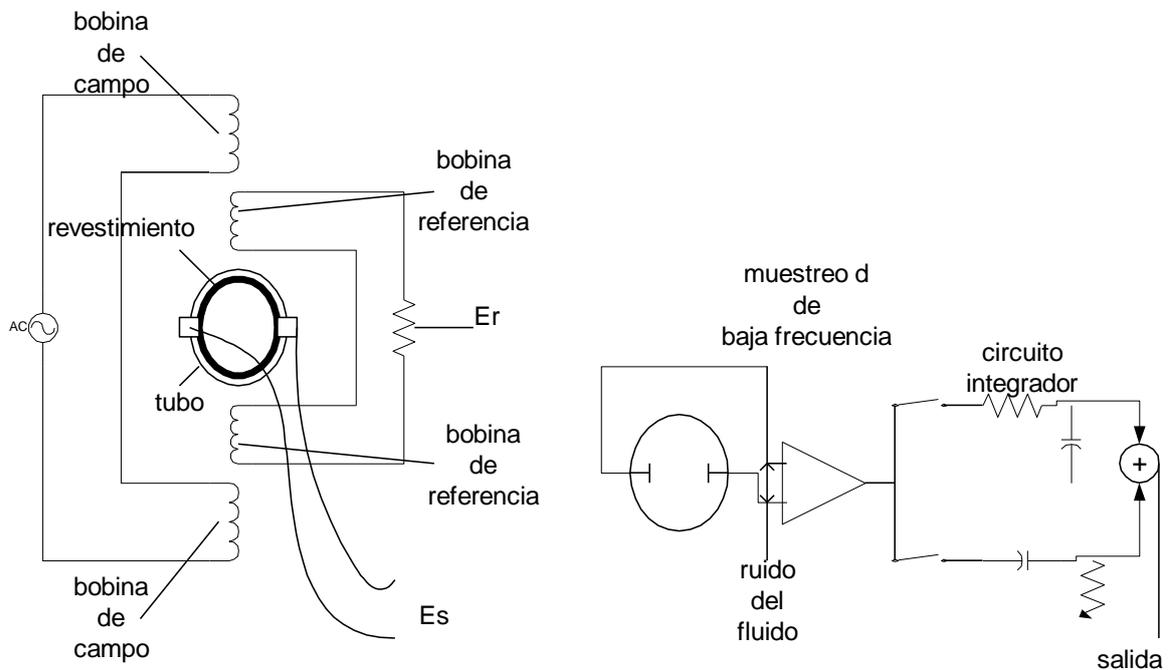


Figura 3.8a Conexión del elemento primario.

En la figura 3.8a puede verse un esquema de conexiones del elemento de medida.

El valor de  $E_r$  se escoge de tal manera que la relación  $E_s/E_r$  se hace constante en todos los medidores de caudal. De este modo se logra su intercambiabilidad con cualquier receptor.

El valor de  $E_r$ , es transmitido al receptor, puede establecerse con completa exactitud, gracias a un potenciómetro colocado normalmente en el medidor y fijado en la fábrica para el valor máximo de caudal.



### 3.3.13 Medidores por desplazamiento positivo

Los medidores por desplazamiento positivo operan atrapando un volumen unitario y conocido de un líquido, desplazándolo desde la entrada hasta la salida, contando el número de volúmenes desplazados en un tiempo determinado. Se conocen con el nombre de genérico de contadores porque cuentan el volumen del líquido independientemente del tiempo transcurrido. Si se desea obtener la medida en forma de caudal, hay que incluir la unidad de tiempo, teniendo entonces que:

$$Q = \frac{Vu(N)}{t} \dots\dots\dots(12)$$

Donde:

$Vu$  = volumen unitario conocido del líquido

$N$  = número de volúmenes desplazados

$t$  = tiempo entre paso de volúmenes

$Q$  = caudal

Dependiendo de las unidades utilizadas se tendrá la medida de caudal en: l/min, m<sup>3</sup>/h, l/h, m<sup>3</sup>/día, etc. La lectura se realiza por medio de un sistema de transmisión mecánica desde el interior del contador hasta el exterior, en cuyo final se encuentra un conjunto de engranajes que hacen mover el contador totalizador de caudal.

Con los contadores se obtiene la medida de forma directa, sin tener que recurrir a ningún tipo de cálculo.

### 3.3.14 Indicadores de nivel

Los medidores de nivel de líquidos trabajan midiendo, bien directamente la altura de líquido sobre una línea de referencia, bien la presión hidrostática, bien el desplazamiento producido en un flotador por el propio líquido contenido en el tanque del proceso, o bien aprovechando características eléctricas del líquido.

Los instrumentos de medida directa se dividen en:

- Medidor de sonda.
- Medidor de cinta y plomada.
- Medidor de nivel de cristal.
- Medidor de flotador.

Los aparatos que miden el nivel aprovechando la presión hidrostática se dividen en:

- Medidor manométrico.
- Medidor de membrana.
- Medidor de tipo burbujeo.
- Medidor de presión diferencial de diafragma.

Los instrumentos que utilizan características eléctricas del líquido se clasifican en:

- Medidor conductivo.
- Medidor capacitivo.
- Medidor ultrasónico.
- Medidor de radiación.
- Medidor láser.

A continuación se describirá el medidor de cristal ya que es el más habitual y económico para monitorear el nivel en los procesos.

Medidor de nivel de cristal

Consiste en un tubo de vidrio con sus extremos conectados al tanque mediante bloques metálicos y válvulas. Se usan por lo general tres válvulas: dos de cierre de seguridad y mantenimiento en los extremos del tubo, con las cuales se impide la fuga de líquido en caso de ruptura del tubo; y una válvula de purga.

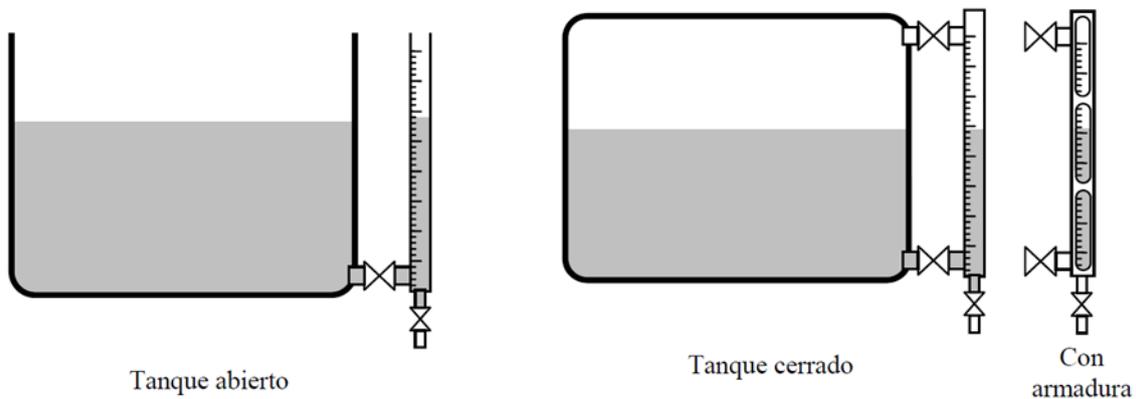


Figura 3.9 Mirilla de vidrio montada en tanque.

El nivel de cristal normal se emplea para presiones de hasta 700KPa, para presiones más elevadas se usa un cristal grueso, de sección rectangular y protegido por una armadura metálica.



### 3.4 Arquitecturas de control

En esta sección se presenta una breve descripción de varias técnicas de control con las que se mejora el desempeño de control logrado mediante el control por retroalimentación. En los diagramas con que se ilustra la implementación se utilizan símbolos de instrumentación analógica. Sin embargo, es necesario recordar que la implementación se puede hacer mediante sistemas con base en microprocesadores; además, con la utilización de estos nuevos sistemas se simplifica en gran medida la implementación. Los principios de las técnicas que se presentan son los mismos, no importa qué tipo de sistema se utilice para implementarlas.

#### 3.4.1 Control por retroalimentación

Este tipo de control fue utilizado por primera vez hace 200 años por James Watt, quien lo uso para el control de velocidad de su máquina de vapor.

Ninguna de las arquitecturas de control avanzadas que se han desarrollado en los últimos 50 años ha podido sustituir esta arquitectura.

Muchos autores consideran que el un sistema de control por retroalimentación (feedback) es modelado después del proceso. Este tipo de arquitectura de control también es conocida como “feedback complementario”, ya que por las características de este controlador complementa la dinámica del proceso. En la figura 3.10 se muestra el diagrama de bloques de un control feedback.

En este control la señal de control depende de la señal de salida, es decir, se requiere medir y retro alimentar la variable controlada para compararse con el valor deseado, y aplicar un algoritmo de control como un PID o un algoritmo adaptivo de lógica difusa.

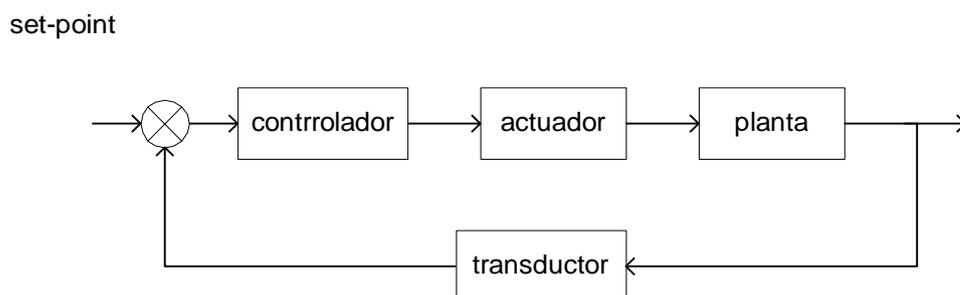


Figura 3.10 Diagrama de bloques control por retroalimentación.



Para explicar este tipo de control recurriremos al ejemplo del intercambiador de calor usado previamente, e ilustrado en la figura 3.10a.

El objetivo es mantener la temperatura de salida del fluido que se procesa,  $T_o(t)$ , en el valor que se desea o punto de control,  $T_o^{fijo}(t)$ , en presencia de variaciones en el flujo del fluido que se procesa,  $F(t)$  y la temperatura de entrada,  $T_i(t)$ . La variable que se puede ajustar para controlar la temperatura de salida es el flujo de vapor;  $F_s(t)$ , ya que determina la cantidad de energía que se suministra al proceso del fluido.

El plan de control por retroalimentación trabaja como sigue: la temperatura de salida o variable controlada se mide con un sensor y transmisor (TT42) que genera una señal  $T_{ot}(t)$  proporcional a k-temperatura; la señal del transmisor o medición se envía, al controlador (TIC42), donde, se compara contra el punto de control, entonces la función del controlador es generar una señal de salida o variable manipulada,  $m(t)$ , con base en el error o diferencia entre la medición y el punto de control. La señal de salida del controlador se conecta entonces al actuador de la válvula de control de vapor, mediante un, transductor corriente a presión (I/P), esto se debe a que en el presente ejemplo el transmisor y el controlador generan señales de corriente eléctrica, pero el actuador de la válvula se debe operar mediante presión de aire. La función del actuador de la válvula es situar la válvula en proporción con la señal de salida del controlador; entonces, el flujo de vapor es una función de la posición de la válvula.

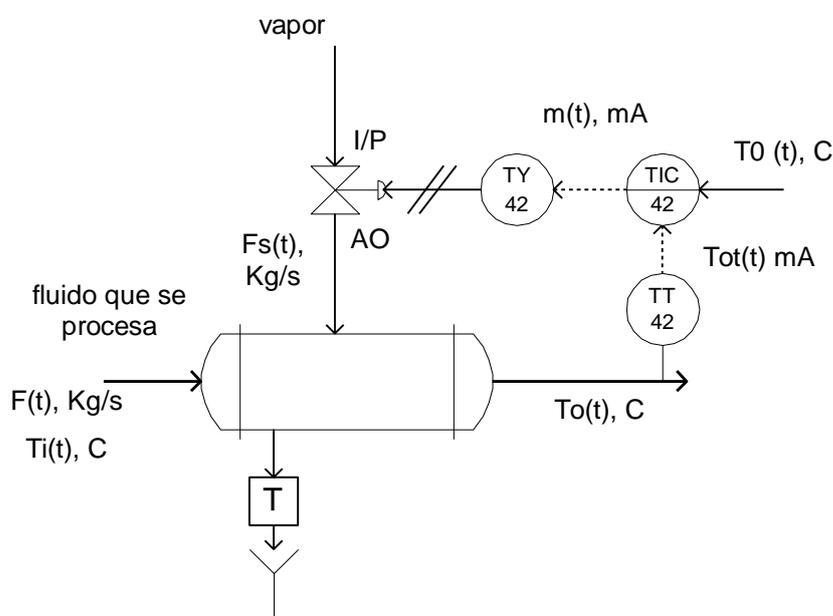


Figura 3.10a DTI control por retroalimentación.



### 3.4.2 Control de relación

El control de relación es un sistema de control en el que una variable del proceso es controlada en relación a otra variable. Mientras que el control en cascada es solo un método que mejora la regulación de una variable, el control de relación satisface una necesidad específica, el control de la relación entre dos cantidades.

La figura 3.11 muestra un diagrama de bloques.

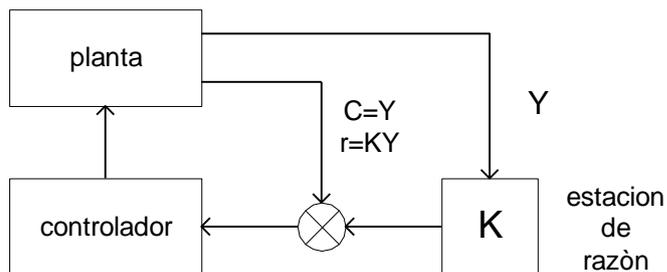


Figura 3.11 Diagrama de bloques control de relación.

En el diagrama se muestra el cálculo del set-point. En esta configuración una de las variables es controlada, y la otra sirve para calcular el set-point, la variable salvaje o no controlada es multiplicada por un coeficiente ajustable K en un componente llamado estación de razón.

Estas cantidades pueden ser fluidos y se explica mejor mediante un ejemplo: se deben mezclar dos corrientes de líquidos A y B, en cierta proporción o razón, R, esto es:

$$R=B/A \dots\dots\dots (20)$$

En la figura 3.12a, se expone una manera fácil de cumplir con dicha tarea; cada flujo se controla mediante un circuito de flujo en el cual el punto de control de los controladores se fija de manera tal que los líquidos se mezclan en la proporción correcta.

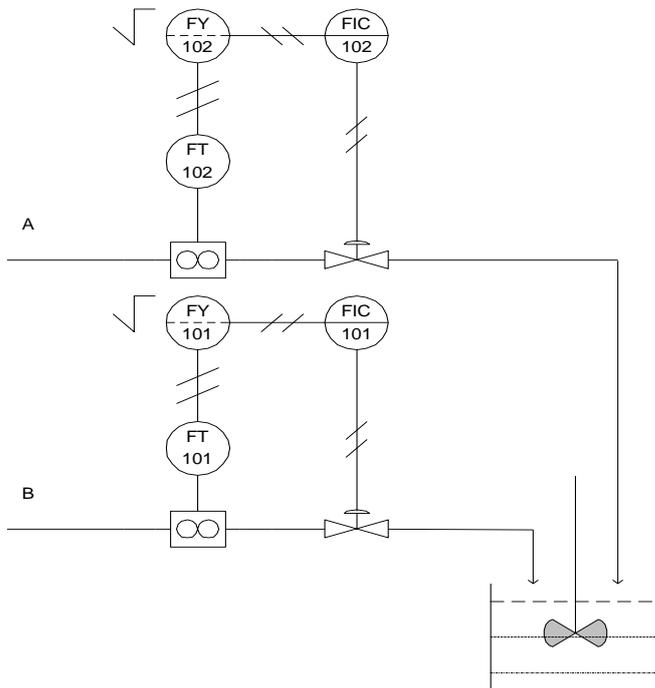


Figura 3.12a Control de relación.

Sin embargo, si ahora se supone que no se puede controlar, uno de los flujos (la corriente A), sino únicamente medirlo, flujo que se conoce como “flujo salvaje”, De alguna manera, la corriente B debe variar conforme varía la corriente A, para mantener la mezcla en la razón correcta; en la figura 3.12b y c se muestran dos esquemas posibles de control de razón. El primer esquema, el cual aparece en la figura 3.12b, consiste en medir el flujo salvaje y multiplicarlo por la razón que se desea (en FY 102B) para obtener el flujo que se requiere de la corriente B. Esto se expresa matemáticamente como sigue:

$$B = (R) (A) \dots \dots \dots (21)$$

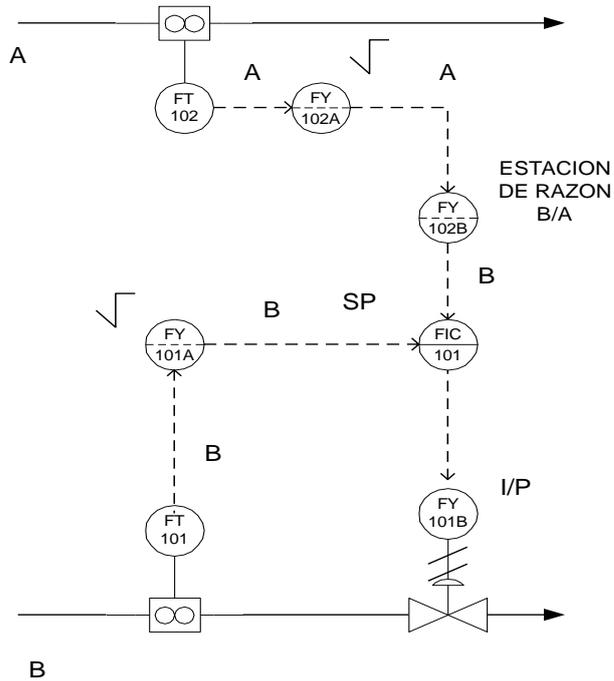


Figura 3.12b Control de relación con controlador de flujo.

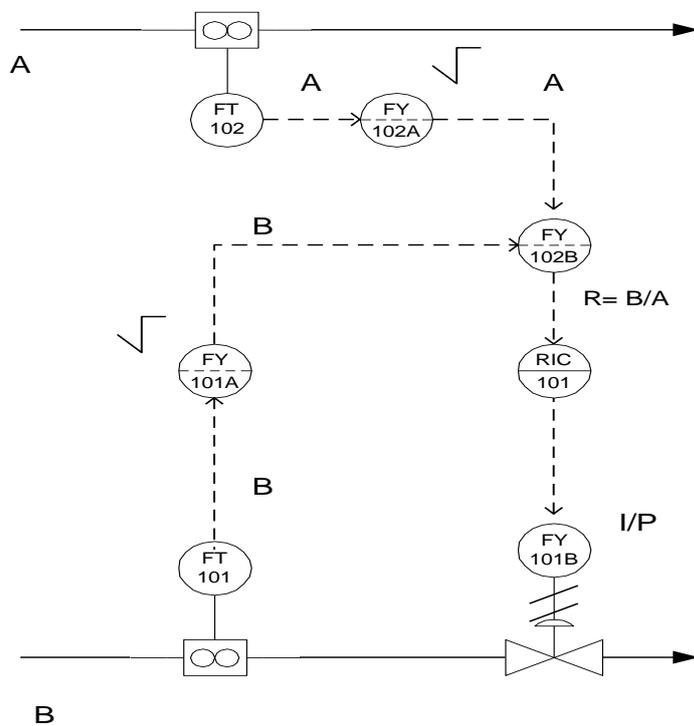


Figura 3.12c Control de relación con estación de razón.

La salida del multiplicador o estación de razón, FY102B, es el flujo que se requiere de la corriente B y, por lo tanto, ésta se utiliza como punto de control



para el controlador de la corriente *B*, FIC101; de manera que, conforme varía la corriente *A*, el punto de control del controlador de la corriente *B* variará en concordancia con aquella para mantener ambas corrientes en la razón que se requiere. Se notará que, si se requiere una nueva razón entre las dos corrientes, la *R* nueva se debe fijar en el multiplicador o estación de razón. También se notará que el punto de control del controlador de la corriente *B* se fija desde otro dispositivo, y no desde el frente del panel del controlador.

El segundo esquema de control de razón, figura 3.12c, consiste en medir ambas corrientes y dividir las (en FY102B) para obtener la razón de flujo real a través del sistema. La razón que se calcula se envía entonces a un controlador, FIC101, con el cual se manipula el flujo de la corriente *B* para mantener el punto de control. El punto de control de este controlador es la razón que se requiere.

Un hecho definitivo acerca de este proceso de mezcla es que, aun cuando se puedan controlar ambos flujos, es más conveniente implementar el control de razón; en la figura 3.13 se muestra un esquema de control de razón para este caso. Si se tuviera que incrementar el flujo total, el operador sólo tiene que cambiar un flujo, el punto de control de FIC101.

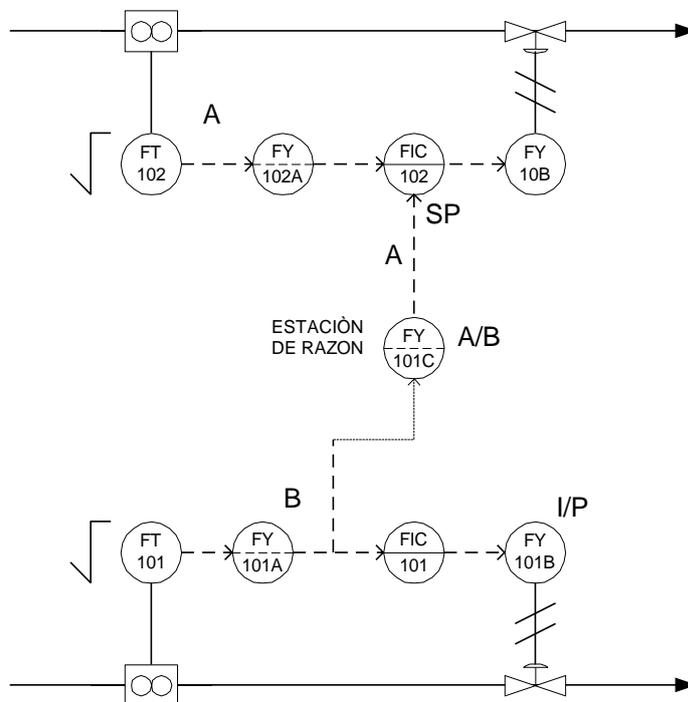


Figura 3.13 Control de proporción ideal.

### 3.4.3 Control en cascada

Esta arquitectura de control es también muy común y es fácil encontrarla en muchos procesos en la industria es una de las técnicas para mejorar la estabilidad de un circuito complejo es el empleo del control en cascada. Su utilización es conveniente cuando la variable controlada no puede mantenerse dentro del punto de consigna, por óptimos que sean los ajustes del controlador, debido a las perturbaciones que se producen en alguna condición del proceso, la figura 3.14 se muestra el diagrama de bloques para un control en cascada.

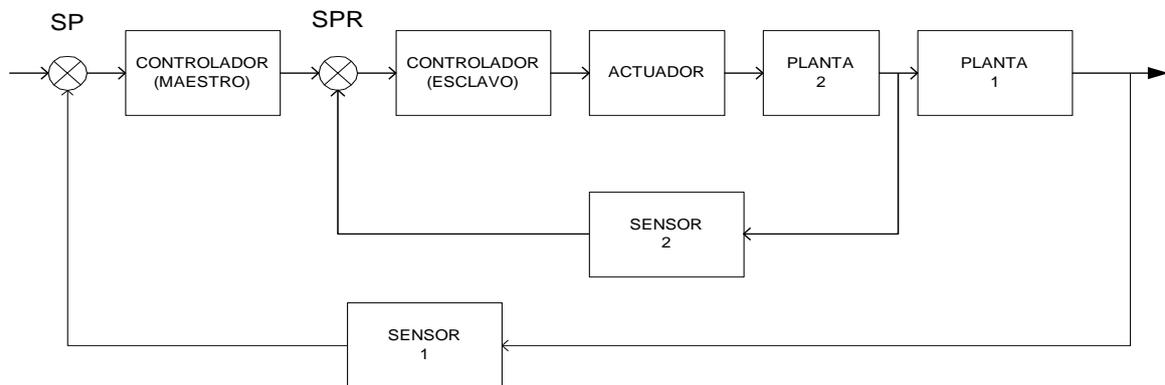


Figura 3.14 Diagrama de bloques de control en cascada.

Ahora se considera el sistema de control para el intercambiador de calor que aparece en la figura 3.14a. En este sistema la temperatura con que sale el líquido que se procesa se controla mediante la manipulación de la posición de la válvula de vapor. Se notará que no se manipula el flujo de vapor, Este depende de la posición de la válvula de vapor y de la caída de presión a través de la válvula; si se presenta una elevación de presión en la tubería de vapor, es decir, si la presión se incrementa antes de la válvula, se cambia el flujo de vapor; esta perturbación se puede compensar por medio del circuito de control de temperatura que se ilustra, únicamente después de que la temperatura del proceso se desvíe del punto de control.

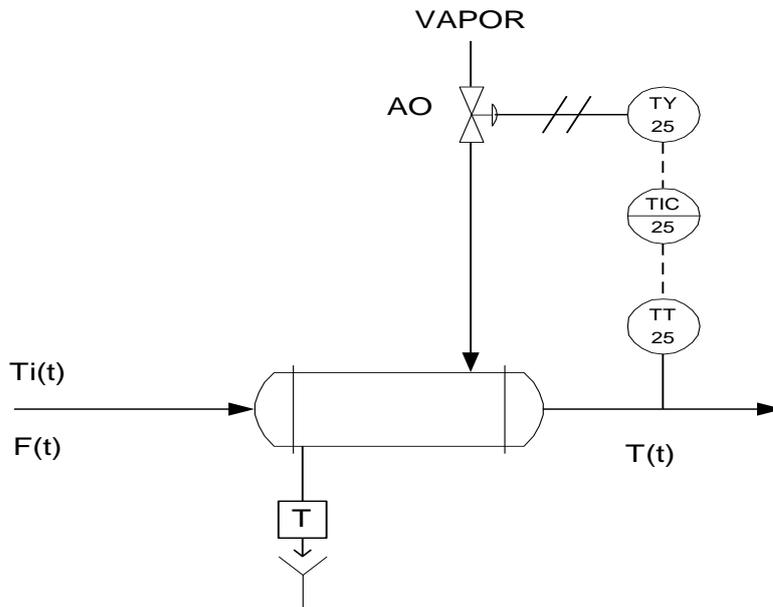


Figura 3.14a Sistema de control de un intercambiador de calor.

En la figura 3.15a y 3.15b se muestran dos esquemas en cascada con que se puede controlar esta temperatura cuando los cambios en la presión de vapor son importantes. En la figura 3.15a se muestra un esquema de cascada en el que se añadió un circuito de flujo; el punto de control del controlador de flujo se reajusta con el controlador de temperatura, ahora cualquier cambio en el flujo se compensa por medio del circuito de flujo. El significado físico de la señal que sale del controlador de temperatura es el flujo de vapor que se requiere para mantener la temperatura en el punto de control. Con el esquema de cascada que aparece en la figura 3.15b se logra el mismo control, pero ahora la variable secundaria es la presión de vapor en el casquillo del intercambiador; cualquier cambio en el flujo de vapor afecta rápidamente la presión en el casquillo, y cualquier cambio de presión se compensa entonces mediante el circuito de presión. Con el circuito de presión también se compensa cualquier perturbación en el contenido calorífico del vapor (calor latente), ya que la presión en el casquillo se relaciona con la temperatura de condensación y, por lo tanto, con la razón de transferencia de calor en el intercambiador. Si se puede instalar un sensor de presión en el intercambiador, entonces la implementación de este último esquema se hace menos costosa, ya que no se requiere un orificio con sus respectivas guarniciones, lo cual puede resultar caro. Ambos esquemas en cascada son comunes en las industrias de proceso.

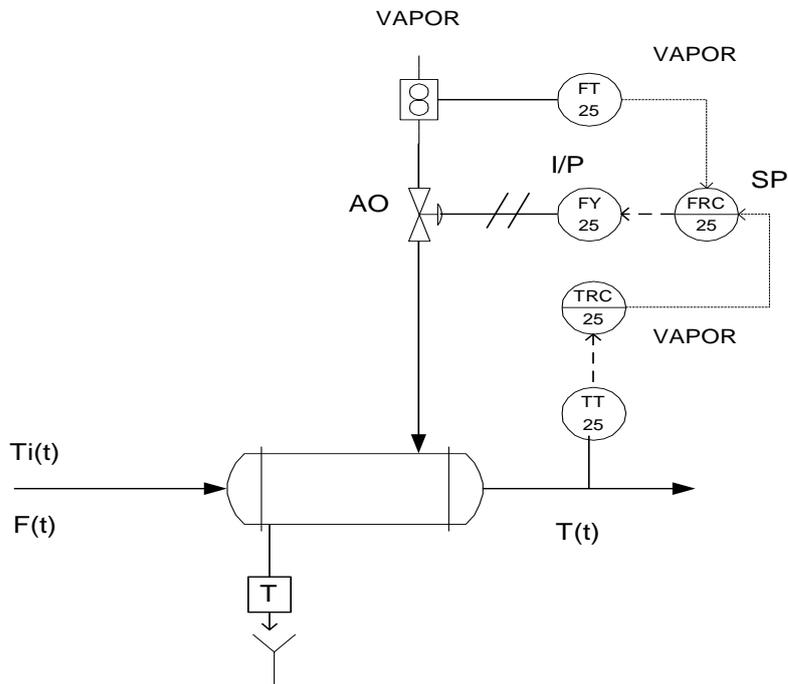


Figura 3.15a Control en cascada con flujo y temperatura.

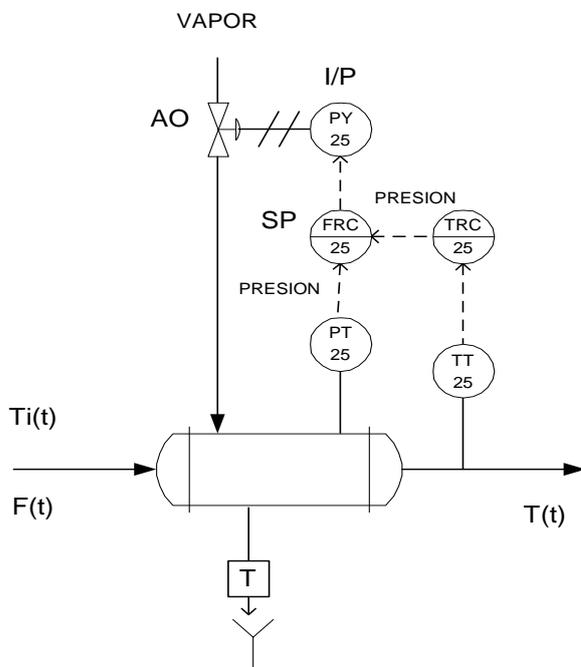


Figura 3.15b Control en cascada con presión y temperatura.



### 3.4.4 Control por acción pre calculada (feedforward)

Los controladores con retroalimentación en el proceso no tienen en cuenta la influencia de las perturbaciones que se producen y que afectan al lazo de control. Debe existir un error para que inicie la acción correctiva, un medio para corregir el efecto de las perturbaciones es el control en adelanto (feedforward). El cual compensa las mismas antes de que produzcan un error en la variable controlada. Este sistema está limitado por la exactitud de las medidas, de los cálculos, y las perturbaciones no medidas.

Cualquier proceso se puede describir en función de las relaciones existentes entre la salida y 2 grupos de entradas: la salida del proceso que es la variable controlada o dependiente ( $V_c$ ), la entrada, a su vez conocida como variable manipulada o independiente ( $V_m$ ), las variables asociadas a la carga son el otro tipo de independientes, conocidas como variables de perturbación ( $V_p$ ) la figura 3.16 muestra un diagrama de bloques en el que aparecen las variables descritas.

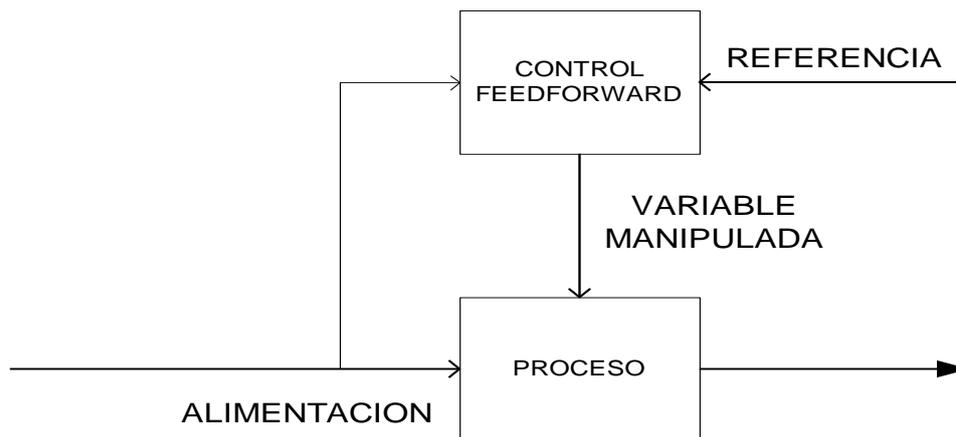


Figura 3.16 Diagrama de bloques de control recalculado.

Como puede verse cada una de las variables llega al proceso en una parte diferente por lo que afectan de manera diferente a la variable controlada. Y la ecuación que describe lo anterior es la Ecuación:

$$V_c = V_m G_m - V_p G \dots\dots\dots (22)$$

Donde  $G_m$  y  $G_p$  son las funciones de transferencia.

El objetivo del sistema de control feedforward es mantener la variable controlada en un valor de referencia, (R), que debe ser igual al valor deseado para la

variable controlada. Con estos datos se puede obtener el valor de la variable manipulada partir de la ecuación 19.

$$Vm = (R + VpGp) / GmKN \dots\dots\dots (23)$$

Si el cálculo de la variable controlada es correcto, para cualquier valor de la variable de perturbación se mantendrá constante el valor de la referencia, es decir, el valor de la variable controlada.

La figura 3.17a muestra un ejemplo de control feedforward en el que la temperatura de salida es la variable controlada, el caudal de producto y su temperatura son las variables de perturbación, mientras que el caudal de vapor es la variable manipulada.

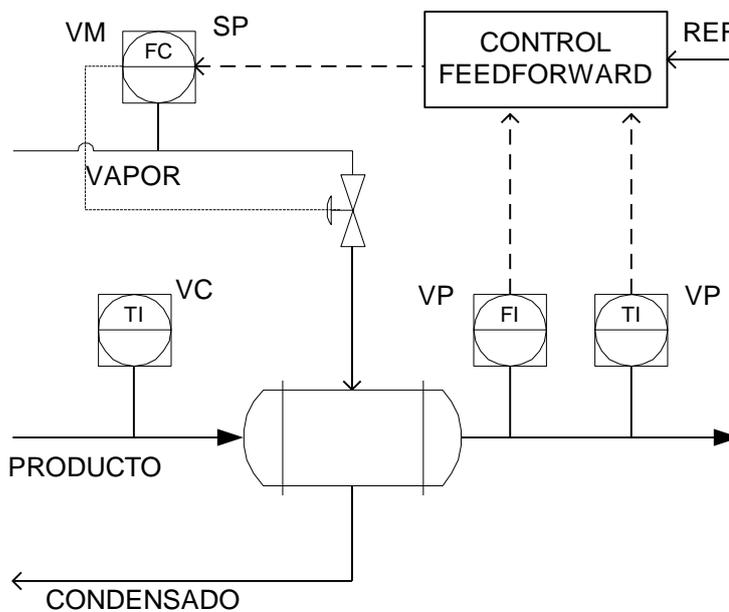


Figura 3.17a DTI control feedforward.

### 3.4.5 Control selectivo (sobre flujo)

Existen muchas ocasiones en las que entre varias medidas o salidas de controladores se debe seleccionar una de ellas, bien por razones de seguridad, eficacia, etc. En el caso de medidas, el sistema solo realiza la función de selector puro, puesto que se trata de variables cuyo valor es fijo. Como ejemplo típico se tiene la selección de temperatura más alta en un reactor, la cual va a ser utilizada como variable de proceso en un controlador. Se trata de seleccionar entre las señales generadas por cada uno de los termopares implicados.



Cuando se trata de seleccionar una salida entre la de varios controladores, la variable a seleccionar no es fija, si no flotante. Las salidas de los controladores no seleccionados tienden a desplazarse hacia un extremo u otro del rango. Esto se debe a que las salidas son el resultado de aplicar la ecuación del controlador PID, que como se sabe, tiene una componente debida a la acción integral que lleva a saturar su salida en alguno de los extremos cuando existe error entre la medida y el punto de consigna. El fenómeno de saturación debido a la acción integral se conoce como *reset windup*, y el tipo de control selectivo se conoce como control *override*.

En el control selectivo *override* existe uno o más controladores cuya salida no está seleccionada, dada la propia naturaleza de este tipo de control. Con el objeto de simplificar, a partir de aquí se supondrá que solo existen dos controladores cuya salida se envía a un selector. El otro controlador tendrá un error permanente entre la variable de proceso (VP) y el punto de consigna (SP), por lo que su salida (OP) será inferior o superior a la seleccionada dependiendo si el selector es de máxima o mínima respectivamente.

Si los controladores sólo disponen de acción proporcional, la salida no seleccionada tendrá un valor fijo proporcional al error. Si además dispone de acción proporcional, la salida no seleccionada llegará a saturarse con el tiempo debido a la integración del error, por lo que si no existe ningún sistema que evite esta saturación la salida se irá a un valor por encima de lo máximo o por debajo de lo mínimo, aunque el indicador de salida este en 0 o 100% respectivamente. Esta particularidad hace que el cambio de variable controlada no se haga justo en el momento en el que la no seleccionada cambie de signo del error, si no que hace falta además que elimine la saturación debida a la acción integral (*reset windup*), para que pase a ser la variable controlada principal.

Para evitar la saturación, los sistemas de control distribuido disponen de limitadores de acción integral, de forma que se evite la saturación del controlador no seleccionado. A modo de ejemplo se describe a continuación un sistema para evitar la saturación.

Existen ocasiones en las que es necesario limitar una variable de proceso en un valor determinado, alto o bajo, para evitar daños al equipo o al proceso, un ejemplo típico lo constituyen estaciones de bombeo en las que existen dos variables controladas y solo una manipulada. Tal como se muestra en la figura 3.18.





### 3.5 Acciones de control

En los controles automáticos industriales son muy comunes los seis tipos siguientes de acción básica de control: de dos posiciones ó todo o nada ó si-no (on-off), proporcional, integral, proporcional y derivativo, proporcional e integral, integral proporcional y derivativo. Es importante conocer las características básicas de las diversas acciones de control para poder elegir la más adecuada según la aplicación.

#### 3.5.1 Control on-off

En un sistema de control de dos posiciones, el elemento accionador tiene solamente dos posiciones fijas, que en la mayoría de los casos son solamente conectado y desconectado. El control de dos posiciones u on-off es relativamente simple y económico, y, por esa razón, es ampliamente utilizado en sistemas de control tanto industriales como domésticos.

Sea la señal de salida de control  $m(t)$  y la señal de error actuante  $e(t)$ . En un control de dos posiciones, la señal  $m(t)$  permanece en un valor máximo o mínimo, según la señal de error actuante sea positiva o negativa de modo que:

$$m(t) = M_1 \quad \text{para} \quad e(t) > 0$$

$$m(t) = M_2 \quad \text{para} \quad e(t) < 0$$

Donde  $M_1$  y  $M_2$  son constantes. Generalmente el valor mínimo  $M_2$  es bien cero ó  $-M_1$ . Los controles de dos posiciones son generalmente dispositivos eléctricos, donde generalmente hay una válvula, relé, o solenoide accionado por una señal eléctrica. También los controles neumáticos proporcionales de muy altas ganancias actúan como controles de dos posiciones. En la figura 3.19 a y b se presentan los diagramas de bloques de controles de 2 posiciones.

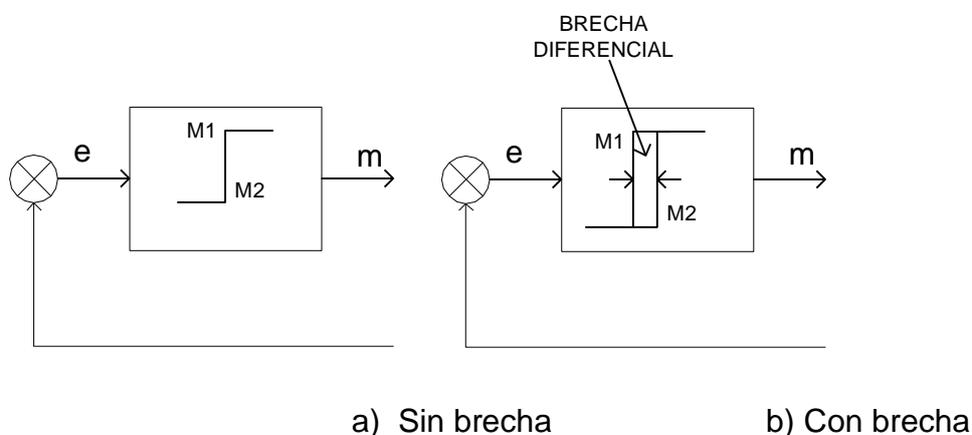


Figura 3.19 Diagramas de bloques de control on-off.



El rango en el que se debe desplazar la señal de error actuante antes de que se produzca la conmutación se llama brecha diferencial. La brecha diferencial hace que la salida del control  $m(t)$  mantenga su valor hasta que la señal de error actuante halla pasado levemente del valor cero, esto se puede observar en la figura 3.20. En algunos casos, la brecha diferencial es resultado de fricción no intencional y movimiento perdido; sin embargo, normalmente se lo provee para evitar la acción excesivamente frecuente del mecanismo on-off.

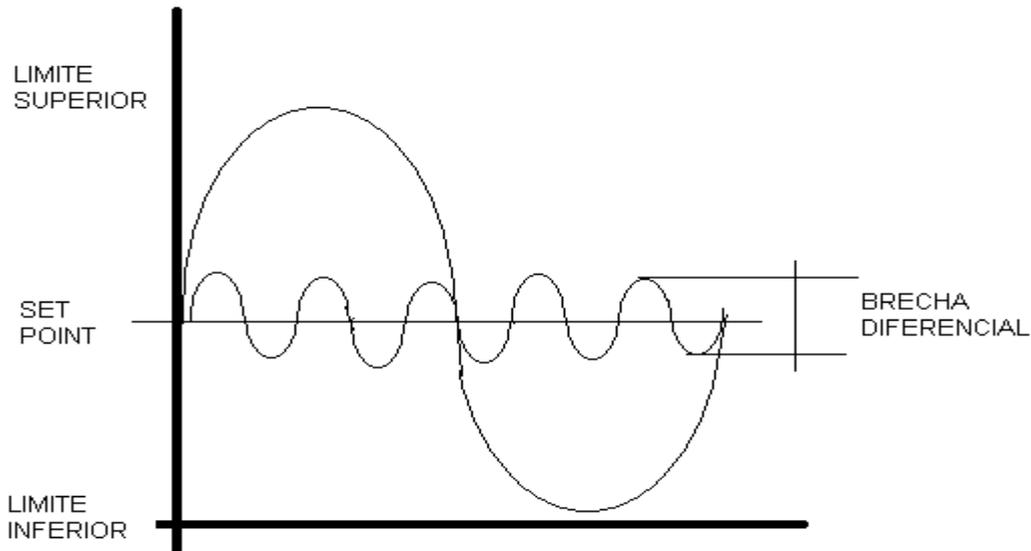


Figura 3.20 Brecha diferencial del control on-off.

### 3.5.2 Control proporcional

Para un control da acción proporcional, la relación entra la salida del controlador  $m(t)$  y la señal de error actuante  $e(t)$  es:

$$m(t) = K_p e(t) \dots \dots \dots (24)$$

Ó en transformada de Laplace:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \dots \dots \dots (25)$$

Donde  $K_p$  se denomina sensibilidad proporcional o ganancia.



Cualquiera que sea el mecanismo en sí, y sea cual fuere lo que alimenta, el control proporcional esencialmente en un amplificador con ganancia ajustable. En la figura 3.21 se observa su diagrama de bloques.

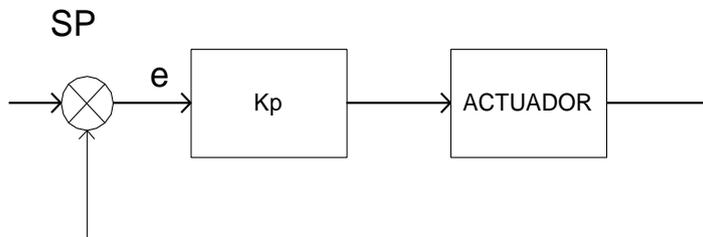


Figura 3.21 Diagrama de bloques de control proporcional.

### 3.5.3 Control integral

En un controlador de acción integral el valor de la salida  $m(t)$  varía proporcionalmente a la señal de error actuante  $e(t)$ , es decir:

$$\frac{dm(t)}{dt} = K_i e(t) \dots\dots\dots(26)$$

O:

$$m(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \dots\dots\dots(27)$$

Donde  $K_i$  es una constante regulable. La función de transferencia del control integral es:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \dots\dots\dots (28)$$

Si se duplica el valor de  $e(t)$ , el valor de  $m(t)$  varía 2 veces más rápido. Para un valor actuante igual a cero, el valor  $m(t)$ , se mantiene estacionario. La acción de control integral recibe a veces el nombre de control de reposición. La figura 3.22 muestra el diagrama de bloques de este control.

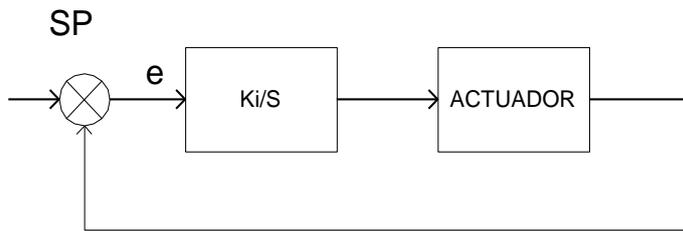


Figura 3.22 Diagrama de bloques control integral.

### 3.5.4 Control proporcional e integral

La ecuación de la función proporcional e integral queda definida por como sigue:

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \dots\dots\dots (29)$$

o la función de transferencia del control es:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \dots\dots\dots (30)$$

Donde  $K_p$  representa la sensibilidad proporcional o ganancia y  $T_i$  el tiempo integral. Tanto  $K_p$  como  $T_i$  son regulables. El tiempo integral regula la acción de control integral, mientras la modificación en  $K_p$  afecta tanto a la parte integral como a la proporcional. A la inversa del tiempo integral  $T_i$  se la llama frecuencia de reposición. La frecuencia de reposición es el número de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control. La frecuencia de repetición se mide en número de repeticiones por minuto. La figura 3.23 muestra el diagrama de bloques del control proporcional integral, y la figura 3.24 muestra su comportamiento con una entrada escalón unitario y su salida.

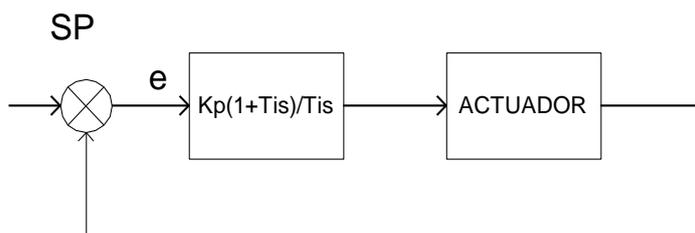


Figura 3.23 Diagrama de bloques control proporcional e integral.

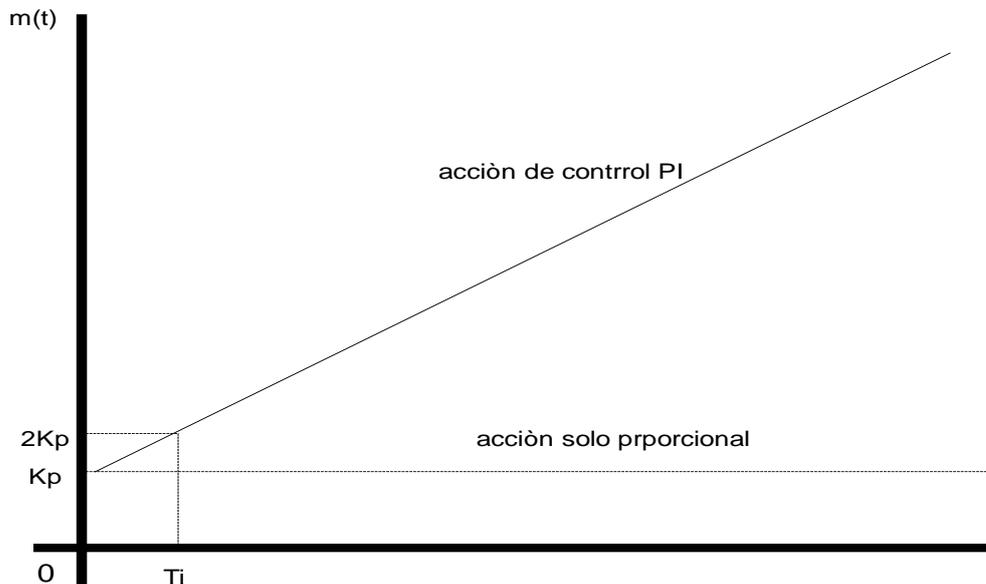


Figura 3.24 Acción proporcional integral con entrada escalón unitario.

### 3.5.5 Control proporcional y derivativo

La acción de control proporcional y derivativo queda definida por la sig. Ecuación:

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \dots\dots\dots (31)$$

Y la función de transferencia es:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p(1 + T_d s) \dots\dots\dots (32)$$

Donde  $K_p$  es la sensibilidad proporcional y  $T_d$  es el tiempo derivativo. Tanto  $K_p$  como  $T_d$  son regulables. La acción de control derivativa a veces nombrad control de velocidad, es cuando el valor de salida del control es proporcional a la velocidad de variación de la señal de error actuante. El tiempo derivativo  $T_d$  es el intervalo de tiempo en que la acción de velocidad se adelanta al efecto de acción proporcional. La figura 3.25 muestra un diagrama de bloques del control proporcional y derivativo y la 3.26 su comportamiento con una entrada de rampa y su salida; cabe mencionar que la razón por la que no se recomienda usar solo el control derivativo es porque cuando se tienen ruidos en la señal este modo de control los amplifica.



Una desventaja del control proporcional derivativo es que opera siempre con una desviación en la variable controlada, y esta solo se puede eliminar con la acción integral, sin embargo soporta una mayor ganancia y puede tener menor desviación que el control proporcional.

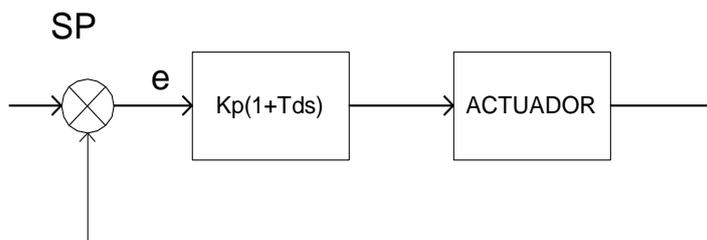


Figura 3.25 Diagrama de bloques de control proporcional y derivativo.

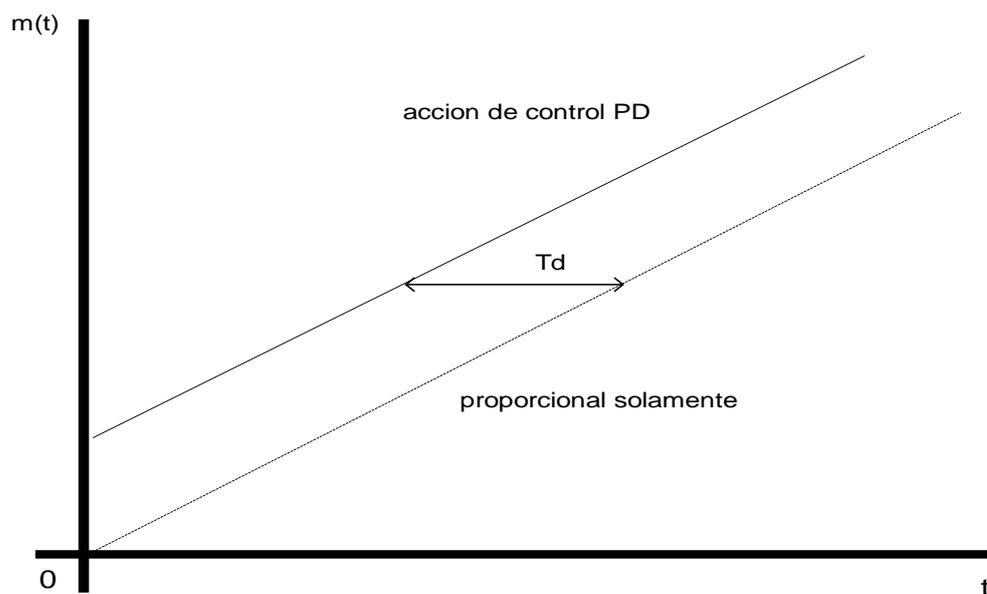


Figura 3.26 Acción proporcional y derivativa con entrada rampa.



### 3.5.6 Control proporcional integral y derivativo

La combinación de los efectos de las acciones de control proporcional, integral y derivativo, se llama control integral proporcional y derivativo (PID) esta acción combinada tiene las ventajas de las tres acciones de control individuales. La ecuación de este control es la siguiente:

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \dots\dots\dots(33)$$

Y su función de transferencia es:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \dots\dots\dots (34)$$

Donde  $K_p$  es la sensibilidad proporcional, y  $T_d$  es el tiempo derivativo y  $T_i$  el tiempo integral. La figura 3.26 muestra el diagrama de bloques del control integral proporcional y derivativo, y la figura 3.27 muestra su comportamiento con una entrada rampa.

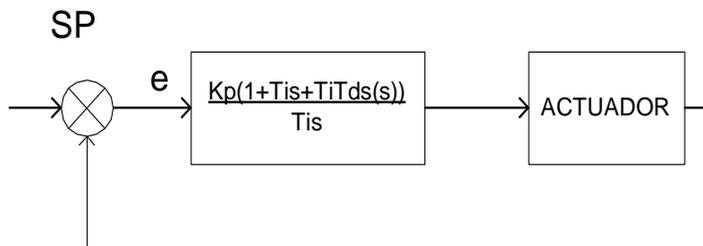


Figura 3.27 Diagrama de bloques control PID.

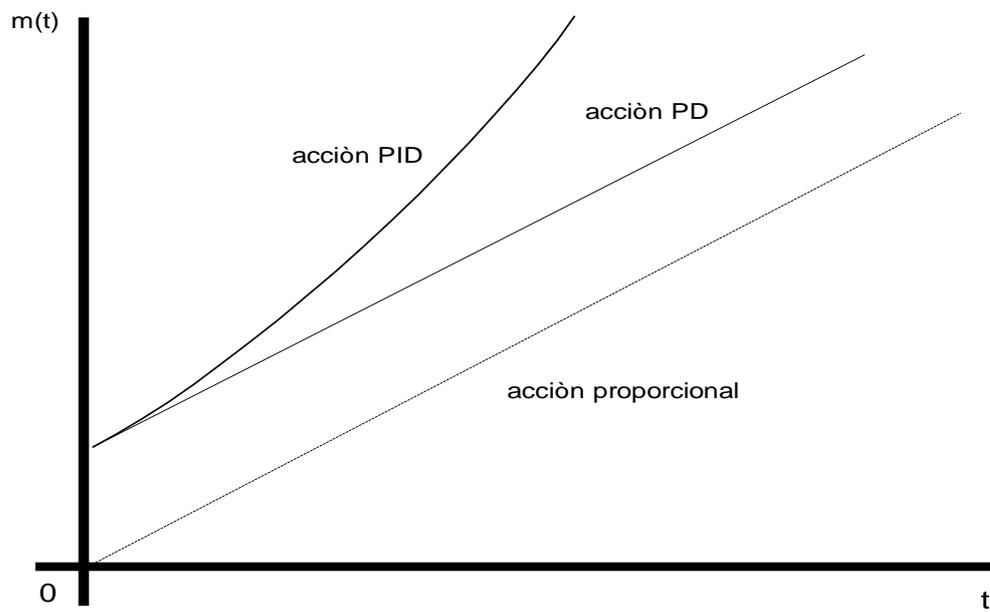


Figura 3.28 Acción PID con entrada rampa.



## CAPÍTULO 4 INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DEL PROCESO DE LAVADO DE ENVASE.

La instrumentación es una herramienta indispensable en el control de procesos y el lavado no es la excepción, el control se diseñan para mantener una variable de proceso (tal como, presión, flujo, nivel, temperatura, etc.) dentro del rango operativo requerido para garantizar la calidad en la elaboración de un producto.

Durante el proceso ocurren perturbaciones que afectan directamente a la variable controlada, por lo que es necesario reducir este efecto, los sensores y transmisores recopilan información sobre la variable de proceso y su relación con algún punto de ajuste preferido. Un controlador procesa esa información y decide la acción necesaria para devolver la variable de proceso al punto debido tras producirse una perturbación. Cuando se han realizado todas las mediciones, comparaciones y cálculos, algún tipo de elemento de control final debe implementar la estrategia seleccionada por el controlador. El elemento de control final más habitual en las industrias es la válvula de control. La válvula de control manipula un líquido en circulación, como gas, vapor, agua o compuestos químicos para compensar las perturbaciones de carga y mantener la variable de proceso regulada lo más cercana posible al punto de ajuste.

## 4.1 Situación actual de lavadora

La lavadora en la planta es un equipo que consta de seis etapas y es capaz de lavar 70560 botellas/hora.

En primera instancia se procede a observar durante los turnos, los problemas más comunes en la etapa de lavado, encontrando área de oportunidad en los cárcamos, el principal problema es la saturación de los cedazos planos, cilíndricos, corrugados.



Figura 4.0 Vista exterior e interior de un cárcamo.

Dicha lavadora cuenta con cuatro cárcamos ubicados en zona de pre enjuague, tanques de detergente, y dos de ellos en zona de pre enjuague final.

Los cedazos juegan un papel muy importante, ya que son los encargados de evitar el paso de partículas grandes tales como popotes, colillas, insectos, bolsas plásticas, a la bomba de succión.

Si no se realiza la limpieza oportuna de cedazos, provoca una considerable disminución de presión en tubos rociadores, además que genera pérdida de nivel en los cárcamos con riesgo que la bomba trabaje en vacío como se muestra en la figura 4.0 y no se tenga un correcto enjuague de botella.



Figura 4.1 Saturación de cedazo cilíndrico.

La problemática radica en que esta lavadora carece de controles, y debido a sus dimensiones es difícil que el operador del equipo, este monitoreando la presión en estos cárcamos debido a sus múltiples actividades.

Siguiendo analizando esta lavadora a fondo encontramos otra problemática, que puede poner en riesgo al producto, en ocasiones se presenta falla en suministro de agua tratada, la cual es ocupada en el enjuague final de la botella, debido a que los monitoreos son cada cuatro horas, es difícil que el operador se percate cuando se presenta la falla, ocasionando un problema de calidad, pues existiría una alta posibilidad que la botella presente trazas de detergente lo que ocasionaría un cambio de sabor en el producto teniendo producto con sabor no característico y pérdidas económicas por el evento de calidad.

## 4.2 Mirillas de vidrio con sensores de alto y bajo nivel

Se cuenta con mirillas en los tanques de detergente para visualizar el nivel, esta, mirilla consiste en un tubo de vidrio con sus extremos conector a bloques metálicos y cerrados por prensaestopas que están unidos al tanque generalmente mediante tres válvulas, dos de cierre de seguridad en los extremos del tubo para impedir el escape del líquido en caso de rotura del cristal y una de purga.



Figura 4.2 Mirilla de vidrio con sensores capacitivos.

Durante el proceso estos tipos de mirillas presentan problemas e inconvenientes en la operación ya que se pueden tapar con facilidad por la naturaleza de la solución caustica manejada en los tanques de detergente; además, a veces se presentan partículas que bloquean los orificios de la mirilla. Lo que se recomienda es purgar la mirilla dos veces al turno la finalidad es descartar que la mirilla se encuentre tapada y marque un nivel que no corresponda. Este tipo de medidor de nivel no es práctico para la operación, se corre el riesgo de tener nivel bajo y afectar el tiempo de contacto de los envases y tener un lavado deficiente.

### 4.3 Sensores

Los sensores con los que cuenta la lavadora en el tanque de detergente son capacitivos, El sensor capacitivo es un interruptor electrónico que trabajan sin contacto. Estos sensores aprovechan el efecto que tienen los materiales como el papel, vidrio, plástico, aceite, agua, así como de los metales, de aumentar la capacidad del sensor cuando se encuentran dentro del campo eléctrico generado.

Cuando un objeto se aproxima a la superficie de sensado y este entra al campo electroestático de los electrodos, cambia la capacitancia en un circuito oscilador.

Esto hace que el oscilador empiece a oscilar. El circuito disparador lee la amplitud del oscilador y cuando alcanza un nivel específico la etapa de salida del sensor cambia.

Estos tipos de sensores presentan grandes ventajas como son:

- Detección sin contacto físico.
- Muy buena adaptación a entornos industriales.
- Estáticos, duración independiente al número de maniobras.

Desventajas:

- Alcance débil.
- Dependen de la masa.



Figura 4.3 Sensor capacitivo.

Los sensores con los que cuenta la maquina son eficaces y funcionan de manera adecuada, también se emplea un sensor inductivo para la apertura de la válvula agua tratada para realizar el enjuague final de la botella. Los sensores de proximidad inductivos son útiles cuando se requiere detectar, sin contacto.

## 4.4 Control de temperatura

El control de temperatura en cada uno de los tanques de remojo de solución caustica, es logrado mediante el uso de RTD's (detectores de temperatura receptivos), y el PLC (controlador lógico programable), la solución es calentada por el intercambiador y esta es analizada por un sensor de temperatura colocado en la tubería, el cual censará la temperatura en cada tanque, y enviará una señal de entrada al PLC para fines de control.

El PLC procesará la señal y la comparará con la temperatura del punto de ajuste, se enviará una señal eléctrica al transductor I/P localizado en la válvula de control. El transductor convertirá la señal eléctrica en una señal neumática proporcional de salida. Esta salida neumática la utiliza la válvula de control para regular el flujo de vapor que pasará a través de ella hacia el intercambiador de calor tipo serpentín, utilizando el vapor descrito, para calentar la solución dentro del tanque. El condensado producido, es recolectado en el sistema de retorno.

El controlador comanda la válvula neumática de vapor con una señal de 4 a 20 mA, proporcional a la temperatura del proceso. Esta válvula está equipada con un conversor electro-neumático que transforma la señal eléctrica en presión de aire, proporcional al mismo. Con esto, la válvula de vapor ajusta su abertura conforme la necesidad del sistema, sin permitir oscilación de temperatura.

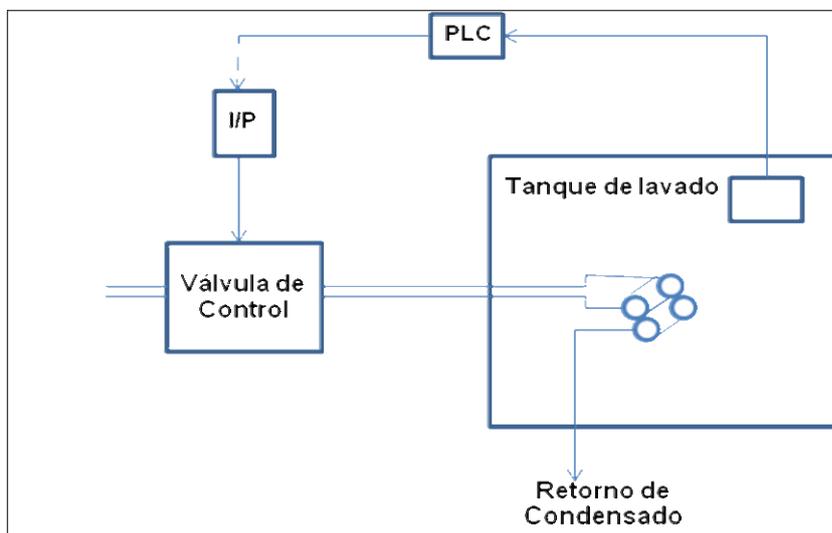


Figura 4.4 Sistema del control de vapor.

Para la medición de temperatura en el proceso se usa un RTD, instrumento adecuado a las necesidades del sistema ya que presenta una mayor exactitud y linealidad que el termopar en la medición, además el rango de medición es menor, y es muy durable en el ambiente en el que trabaja.



## 4.5 Monitoreo del proceso y alarmas

Actualmente solo se puede monitorear dos variables en la máquina, temperatura y concentración por medio de alarma audio visual, las alarmas desempeñan la función de advertencia cuando el proceso se encuentra en condiciones no ideales.

La problemática actual es que se deben de monitorear todas las variables para garantizar un correcto lavado de envase, esto permitirá tener un control adecuado por parte del operador y un tiempo de respuesta rápido para activar las correcciones en el proceso.

## 4.6 Control de la concentración de sosa caustica

El sistema de control de sosa se realiza a través de un plc que está programado para dosificar la sosa de manera automática.

Con este tipo de control se tiene:

- Monitoreo continuó del estado de la maquina durante todo el proceso de lavado.
- Control de sosa caustica en tiempo real.



## CAPÍTULO 5 PROPUESTA DE MEJORA DEL PROCESO DE LAVADO

La finalidad de este capítulo es mejorar las condiciones de operación originales, para eliminar un evento de calidad con la implementación de este proyecto se busca mejorar el proceso de lavado.

### 5.1 Propuesta para estandarizar a los inspectores visuales

Una de las estrategias para lograr los objetivos y conducir a un concepto de calidad total es enfocar los esfuerzos a nuestros inspectores ya que ellos son el primer candado para lograr el resultado que se desea, se pretende llevar al personal a una selección adecuada para que no ponga en riesgo el producto, para esto se comenzara a concientizar al personal de la importancia de hacer una buena selección. La idea fundamental es que el personal retire todo aquel envase que no se lave con las condiciones actuales de operación como son temperatura y concentración de sosa, variables ya definidas dentro de los límites de control, la primera parte es experimental realizando estudios de lavado, clasificando el envase de acuerdo al siguiente criterio, envase grado cero, uno, dos y tres.

Este estudio nos dará la clave para determinar qué tipo de envase es capaz de lavar nuestro equipo.

- Envase grado cero: Son las botellas que a simple vista no presentan ningún tipo de suciedad aparentemente la botella se observa limpia, estas botellas.



Figura 5.0 Botellas grado cero.

- Envase grado uno: Este tipo de envase presenta pequeños hongos en la pared, además la base de la botella presenta producto caramelizado con formación de hongos.



Figura 5.1 Botellas grado uno.

- Envase grado dos: El cuerpo de la botella presenta suciedad interna, tierra, insectos pegados a las paredes, con acumulación de suciedad en la base. Envase expuesto a intemperie.



Figura 5.2 Botellas grado dos.

- Envase grado tres: Presenta residuos orgánicos en el cuerpo de la botella, insectos pegados, La base de la botella se encuentra cubierta por, tierra, salitre, e insectos incrustados en la base, su retiro requiere tallado mecánico.



Figura 5.3 Botellas grado tres.

Derivado de la problemática presentada en dicha lavadora se procede a realizar el estudio de lavado, cuando se tienen condiciones óptimas de operación, es decir cedazos limpios libres de materia extraña y suciedad; de acuerdo a la clasificación mencionada anteriormente.

lavadora	tanque 2	tanque 3
Temperatura °C	61.3	62.1
Concentracion de sosa	2.49%	2.52%
Nivel de tanque de sosa	Cumple	Cumple
Presion de pre enjuague	1.2 kg/cm <sup>2</sup>	1.5 kg/cm <sup>2</sup>
Alineación de chorros	Correcta	Correcta
Presion de tanque popotero	1.0 kg/cm <sup>2</sup>	
Presion del chorro caustico	1.2 kg/cm <sup>2</sup>	

Tabla 5.1 condiciones óptimas de lavadora cedazos limpios sin partículas extrañas.

Se realiza el estudio para los grados cero, uno, dos y tres, bajo las condiciones de la tabla 5.1. Obteniendo los siguientes resultados mostrados en la tabla 5.2

Clasificación del estudio	Eficiencia de lavado
Grado cero	100%
Grado uno	100%
Grado dos	80.2%
Grado tres	60.8%

Tabla 5.2 Resultado del estudio de lavado

El estudio consiste en meter 56 botellas acomodadas a lo largo del cangilón identificándolas y una vez lavadas se impregnan de un colorante que es el azul de metileno que revela las zonas donde no hubo un buen lavado de botella.

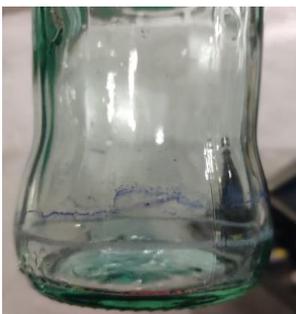


Figura 5.4 Botella mal lavada.



Las condiciones de la tabla 5.1 son ideales, pero en realidad el proceso se encuentra con acumulación de suciedad en cedazos, lo que provoca disminución en las presiones, se procede a realizar un segundo estudio bajo esa problemática, para evaluar el desempeño de lavado.

lavadora	tanque 2	tanque 3
Temperatura °C	61.8	61.7
Concentración de sosa	2.50%	2.63%
Nivel de tanque de sosa	Cumple	Cumple
Presión de pre enjuague	0.6 kg/cm <sup>2</sup>	0.4 kg/cm <sup>2</sup>
Alineación de chorros	Correcta	Correcta
Presión de tanque popotero	0.4 kg/cm <sup>2</sup>	
Presión del chorro caustico	0.8kg/cm <sup>2</sup>	

Tabla 5.3 Condiciones con saturación de cedazos por suciedad.

Clasificación del estudio	Eficiencia de lavado
Grado cero	94.6%
Grado uno	90.3%
Grado dos	50.1%
Grado tres	38.2%

Tabla 5.4 Resultado del estudio de lavado para diferentes grados de suciedad bajo las condiciones de la tabla 5.3.

Analizando los resultados del primer estudio surge la necesidad de retirar de lámparas de inspección todo el envase con suciedad grado dos y tres, para eliminar el riesgo de generar un envase mal lavado.

Además, con los datos obtenidos del segundo estudio de lavado se llega a la siguiente conclusión si no se tienen las condiciones óptimas en limpieza de cedazos, se corre el riesgo de tener envase mal lavado razón por la cual se propone lo siguiente para asegurar el proceso.



## 5.2 Transmisor de presión diferencial

Se estarían colocando transmisor de Presión diferencial en la descarga de la bomba centrífuga de los cárcamos, del tanque popotero, chorros cáusticos y pre enjuague, debido a la gran saturación de los cedazos planos, cilíndricos y corrugados, La finalidad es avisar al operador una vez que se detecte una baja presión en el sistema, mediante una alarma sonora y mandar la señal de advertencia a su pantalla HMI, para que proceda a realizar el cambio de cedazo.

Si no se realiza la limpieza oportuna de cedazos, provoca una considerable disminución de presión en tubos rociadores, además que genera pérdida de nivel en los cárcamos con riesgo que la bomba trabaje en vacío, además el primer enjuague en el tanque popotero es sumamente importante ya que aquí se remueve gran cantidad de suciedad, por lo tanto, asegurando este enjuague la botella tendrá menor cantidad de contaminación y la etapa de lavado será más eficiente.



Figura 5.5 Saturación de cárcamo por partículas y suciedad.



La problemática radica en que esta lavadora carece de controles, y debido a sus dimensiones es difícil que el operador del equipo, este monitoreando la presión en estos cárcamos debido a sus múltiples actividades.

Se propone colocar el siguiente transmisor de presión diferencial EJX110A

#### Características

- $\pm 0.04\%$  de Precisión (opción disponible de Precisión de  $0.025\%$ )
- $\pm 0.1\%$  por 15 años de Estabilidad
- 90 milisegundos de Tiempo de Respuesta
- 3,600 psi MWP



Figura 5.6 Transmisor de presión diferencial EJX110A

### 5.3 Propuesta para controlar el flujo de enjuague final

Debido a que en ocasiones se presenta falla, en suministro de agua tratada, la cual es ocupada en el enjuague final de la botella, se estaría colocando un transmisor de flujo electromagnético, este nos ayudara a sensar el fluido y cuando no detecte flujo se estará mandado a para la carga de lavadora, para detener el proceso inmediatamente, esto se propone debido a que los monitoreos son cada cuatro horas por parte del operador, son monitoreos muy prolongados y es difícil que el operador se dé cuenta si la falla se presenta por las dimensiones de la lavadora , la finalidad de instalar este medidor es evitar ocasionar un problema de calidad, pues existiría una alta posibilidad que la botella presente trazas de detergente, por no enjuagarse correctamente lo que ocasionaría un cambio de sabor en el producto teniendo producto con sabor no característico.

El medidor de flujo que se propone para este proyecto es el Yokogawa, ADMAG AXF, mostrado en la figura 5.2, el cual cuenta con la excitación de doble frecuencia comprobada, la cual ha sido añadida recientemente según el fabricante para hacer frente a las aplicaciones más severas. El AXF tiene funciones fáciles de usar; como una función de diagnóstico nivel de adhesión del electrodo, interruptores infrarrojos que pueden ser utilizados para establecer los parámetros sin la necesidad de abrir la cubierta de la caja, la capacidad para cambiar la dirección de la conexión eléctrica en el sitio.



Figura 5.7 Medidor de flujo Yokogawa ADMAG AXF.

## 5.4 Tanque buffer

Adicional a lo propuesto hasta ahora se observa otra problemática debido a las múltiples tareas del operador, con frecuencia el tanque buffer se queda vacío, ocasionado bajas concentraciones en los tanques de detergente, ya que, la sosa se dosifica automáticamente del tanque buffer al tanque de lavado, concentración baja de sosa provoca un mal lavado de botella.

Para evitar estos eventos, se estará implementado colocar al tanque buffer un sensor capacitivo KQ6001 para sensar el bajo nivel, se estará programando al plc que se tiene instalado en lavadora y estará mandado señal de advertencia sonora al operador para solicitar recarga de sosa cuando se tenga un nivel bajo.



Figura 5.8 Tanque buffer de sosa.

Se propone colocar un sensor capacitivo KQ 6001

- Parametrización sencilla mediante IO-Link.
- Función de salida NA/NC programable.
- Detección automática de la carga de salida PNP/NPN.
- Montaje sencillo mediante un adaptador de montaje y de cintas de fijación.
- Para detección de posición o para supervisión del nivel.



Se plantea instalar válvula neumática para controlar apertura y cierre, en una recarga de sosa, la necesidad radica porque se tiene el mismo ramal para abastecer las tres lavadoras, si por error el operador olvida cerrar la válvula al termino del envío, se tiene el riesgo cuando se pida un envío a otra línea, que este se suministre al tanque buffer incorrecto, ocasionando rebose directo al tanque de detergente, elevando la concentración y provocando arrastre caustico en las botellas lavadas, es decir botellas con trazas de detergente.

Lo que se busca con esta propuesta es evitar un aumento en la concentración de los tanques de detergente, ya que, si el tanque buffer tiene nivel la sosa estará rebosando directamente al tanque.



Figura 5.9 Tanque buffer indicando la válvula que se instalara.

### 5.5 Propuesta de tanque de caustico

Adicional para mejorar el desempeño de lavado del envase se propone ocupar el tanque 1 actualmente usado como remojo, como un tanque de detergente la finalidad es tener una etapa adicional de lavado con solución caustica para garantizar la eliminación completa de la suciedad. Esto ayudara a incrementar el tiempo de contacto y la botella pasara más tiempo inmersa en la solución con esto se asegurara el lavado de la botella, al tanque se le estaría colocando sensor de conductividad y se estaría conectado al plc del sistema de dosificación automática con el que cuenta la máquina.

Como última propuesta se busca utilizar el primer tanque actualmente utilizado con agua caliente, como un tanque de remojo de solución caustica.



## Conclusión

Esta lavadora en sus inicios estaba a la vanguardia en cuanto a elementos de control pero con el paso del tiempo se necesita innovar y mejorar las condiciones para una operación efectiva, el equipo necesita adecuarse con instrumentos para un mejor monitoreo de las variables que afectan directamente al lavado de botellas.

Los estudios realizados de lavado permitieron identificar las principales causas del envase mal lavado, con ello se recomienda atender dos factores que no se tomaban en cuenta durante la operación los cuales garantizarán resultados favorables:

- Asegurar la selección en lámparas de inspección y retirar todo el envase grado 2 y grado 3, este envase tiene deficiencia en el lavado.
- Con la Instalación del transmisor de presión diferencial en los cárcamos, se busca mantener la condición de operación estable; con esto se evitara una limpieza mecánica deficiente en los baños a chorros. cada vez que exista una saturación se tendrán que activar la acción correctiva que es cambiar el cedazo, esta actividad la estará ejecutando el operador de la máquina.

La operación de la lavadora exige mucho al operador para estar levantado botella caída en la mesa de carga, y por sus dimensiones de la maquina es necesario tener el control y monitoreo de todas las variables que afectan el proceso de lavado en un punto estratégico donde el operador pueda visualizarlas; si alguna de ellas sale de control se detendrá el proceso y se llevara a condiciones aceptables. La finalidad es eliminar la probabilidad de generar envase mal lavado.



## Bibliografía

ACEDO SÁNCHEZ, José. *Control avanzado de procesos (Teoría y práctica)*. Díaz de Santos. 2003. pp. 579

CREUS SOLÉ, Antonio. *Instrumentación industrial*. Alfaomega Marcombo. 1997. pp. 644.

KATSUHIKO, Ogata. *Ingeniería de control moderna*. Prentice Hall. 1980. pp. 902

LUYBEN, Michael L. y LUYBEN, William. *Essentials of process control*. McGraw Hill. 1997. pp. 584

OATES, Joseph A.H. *Lime and limestone (Chemistry and technology, production and uses)*. WILEY-VCH. 1998. pp. 455

SHINKEY, F. G. *Process control systems (application, design, adjustment)*. McGraw Hill. 1967. pp. 367

SMITH A., Carlos y CORRIPIO B., Armando. *Control automático de procesos (teoría y práctica)*. Noriega Limusa. 1991. pp. 717.

<https://www.ifm.com/mx/es/product/KQ6001>

<https://www.yokogawa.com/mx/solutions/products-platforms/field-instruments/pressure-transmitters/differential-pressure/ejx110a/>

<https://instrumentacionycontrol.net/los-posicionadores-de-valvulas-conceptos-claros-y-definitivos/>

<https://www.yokogawa.com/mx/solutions/products-platforms/field-instruments>