



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

**DISEÑO DE LA AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO DE
TRATAMIENTO DE AGUA DE UNA FÁBRICA DE DULCES**

GUSTAVO ADOLFO RODRÍGUEZ ALARCÓN

Asesorado por: Ing. Jorge Luis Muñoz Monroy

Guatemala, Agosto 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE LA AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO DE TRATAMIENTO DE
AGUA DE UNA FÁBRICA DE DULCES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

GUSTAVO ADOLFO RODRÍGUEZ ALARCÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, AGOSTO 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Julio Ismael González Podszueck
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Rodolfo Francisco Espinoza Smith
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl De León de Paz
SECRETARIO	Ing. Francisco Javier Gonzáles López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**DISEÑO DE LA AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO DE TRATAMIENTO DE
AGUA DE UNA FÁBRICA DE DULCES,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de ingeniería química con fecha 9 de octubre del 2003.

Gustavo Adolfo Rodríguez Alarcón

Guatemala, Julio 11 del 2,005

Ing. Julio Rivera Palacios
Escuela de Ingeniería Química
Universidad de San Carlos de Guatemala

Apreciable Ingeniero Rivera:

Por este medio me permito informarle que he revisado el trabajo de Graduación del estudiante de Ingeniería Química, Gustavo Adolfo Rodríguez Alarcón titulado: **DISEÑO DE LA AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO DE TRATAMIENTO DE AGUA DE UNA FABRICA DE DULCES.**

He encontrado el trabajo satisfactorio, por lo que lo remito a su consideración, para proseguir con los trámites correspondientes.

Atentamente,



Ing. Químico Jorge Luis Muñoz Monroy

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 19 de julio de 2,005

Ingeniero
Julio Rivera Palacios
Director Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Rivera.

Después de saludarlo, me permito hacer de su conocimiento que he revisado el trabajo de Graduación del estudiante **Gustavo Adolfo Rodríguez Alarcón**, titulado: **"DISEÑO DE LA AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO DE TRATAMIENTO DE AGUA DE UNA FÁBRICA DE DULCES "**, lo he encontrado satisfactorio y por tanto le otorgo mi aprobación.

Sin otro particular y agradeciéndole la atención que se sirva dar a la presente, le saluda

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODO"

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Otto Raúl De León de Paz'.

Ing. Otto Raúl De León de Paz
REVISOR

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Química Ing. Federico Guillermo Salazar Rodríguez, después de conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe del Departamento al trabajo de de Graduación del estudiante Gustavo Adolfo Rodríguez Alarcón, titulado: "DISEÑO DE LA AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO DE TRATAMIENTO DE AGUA DE UNA FÁBRICA DE DULCES", procede a la autorización del mismo.

Ing. Federico Salazar Rodríguez
DIRECTOR ESCUELA INGENIERIA QUIMICA



Guatemala, agosto de 2,005

Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato
Tels. 24769579 Exts. 101-102-114
Fax: 24760385

Ref. DTG. 308-2005.

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE LA AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO DE TRATAMIENTO DE AGUA DE UNA FÁBRICA DE DULCES**, presentado por el estudiante universitario **Gustavo Adolfo Rodríguez Alarcón** procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. ~~Murphy Olympto Paiz Recinos~~
DECANO



Guatemala, agosto 10 de 2,005

/gdech

DEDICATORIA

A:

DIOS

Que me ha acompañado en todo momento y me ha permitido llegar a concluir esta etapa de mi vida.

MIS PADRES

Sabios, pacientes y amorosos maestros, que con sus enseñanzas y ejemplos me ayudaron a ser la persona que soy.

MI ESPOSA

Por su amor, y apoyo incondicional en todo momento.

MIS HERMANOS Y DEMAS FAMILIA

Por ese cariño brindado, exhortándolos a esforzarse a cumplir sus metas propuestas.

USTED

Por estar compartiendo junto a mi, este logro importante.

AGRADECIMIENTOS

A:

El ingeniero Jorge Luis Muñoz Monroy, por su valiosa asesoría en la preparación y ejecución de este trabajo.

El ingeniero Otto Raúl de León, por su dedicación a la revisión de este trabajo.

La Universidad de San Carlos de Guatemala, por los conocimientos brindados durante el tiempo que estuve en ella.

Todas aquellas empresas y técnicos que colaboraron con información para la realización de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII

1. SISTEMAS GENERADORES DE VAPOR

1.1 Usos	1
1.2 Estructura y tipos.....	2
1.3 Agua de alimentación	3
1.3.1. Sólidos disueltos	7
1.3.2. Dureza total	8

2. SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO DE PROCESOS

2.1 Principios básicos de sistemas de control	15
2.2 Retroalimentación de lazo de control	17
2.3 Tipos de sistemas de control	20

2.3.1. Control encendido / Apagado	20
2.3.2. Modo proporcional.....	23
2.3.3. Modo integral	28
2.3.4. Modo derivativo	32
2.4 El PLC.....	35
2.4.1. Estante principal	37
2.4.2. Fuente de alimentación	37
2.4.3. CPU	37
2.4.4. Tarjetas de entradas y salidas	38
3. SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA	
3.1 Filtración	39
3.2 Suavización.....	40
3.2.1. Intercambio iónico	41
4. SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LA FABRICA DE DULCES EN ESTUDIO	
4.1 Uso.....	43
4.2 Descripción del equipo	43
4.2.1. Filtro rápido	43
4.2.2. Suavizador.....	44
4.2.3. Conexiones y accesorios	45

4.3	Funcionamiento del equipo	46
4.3.1.	Servicio	46
4.3.2.	Retrolavado	47
4.3.3.	Regeneración	48
4.3.4.	Enjuague	49
4.4	Mediciones	50
5.	AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA	
5.1	Selección de modos de control automático	53
5.2	Selección de ciclos de control automático	53
5.3	Selección de componentes necesarios	54
5.4	Diseño de automatización	55
5.4.1.	Variable principal a controlar.....	55
5.4.2.	Dimensionamiento del tanque pulmón.....	58
5.4.3.	Tanque de salmuera.....	62
5.4.4.	Descripción de la automatización del sistema	63
5.4.4.1	Generalidades	63
5.4.4.2	Tanque pulmón.....	67
5.4.4.3	Tanque de salmuera.....	69
5.4.4.4	Filtro y suavizador.....	72
5.4.4.5	Panel del operador.....	73
5.5	Descripción del funcionamiento del equipo.....	75

5.5.1. Funcionamiento del filtro.....	76
5.5.1.1 Filtración.....	76
5.5.1.2 Retrolavado.....	76
5.5.2. Funcionamiento del tanque de salmuera.....	77
5.5.2.1 Preparación de salmuera.....	77
5.5.2.2 Despacho de salmuera.....	77
5.5.3. Funcionamiento del suavizador.....	78
5.5.3.1 Operación.....	78
5.5.3.2 Retrolavado.....	78
5.5.3.3 Regeneración.....	79
5.5.3.4 Enjuague.....	79
5.5.4. Funcionamiento del tanque pulmón.....	79
5.5.5. Varios.....	80
6. ANÁLISIS DE COSTO DE DISEÑO	
6.1 Costo de la automatización del equipo	83
6.2 Perdida económica por incrustación.....	84
6.2.1. Consumo energético por año	86
6.2.2. Gasto actual de combustible por año	86
6.2.3. Gasto extra de combustible por año	86
6.2.4. Ahorro de combustible por año	87
6.3 Incrustación potencial de la caldera	88

6.4	Ahorro en consumo de productos químicos	89
6.5	Limpieza química de caldera	90
6.6	Resultados del análisis del costo de diseño	91
CONCLUSIONES.....		93
RECOMENDACIONES.....		95
BIBLIOGRAFÍA.....		97
ANEXOS.....		99

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Diagrama de flujo agua vapor	6
2	Efecto de la incrustación en la transmisión de calor en caldera	11
3	Lazo de control con retroalimentación básica	18
4	Proceso por lotes y controlador	21
5	Proceso continuo	24
6	Acción del control proporcional	26
7	Cisterna, analogía para compensación	32
8	Esquema de tratamiento de agua actual	46
9	Diseño de automatización del sistema	64
10	Sistema automático de tanque pulmón	69
11	Sistema automático de tanque salmuera	72
12	Diseño de panel del operador	74
13	Incrustación potencial de la caldera	88

TABLAS

I	Volúmenes de agua tratada entre regeneraciones	56
II	Tiempos de mantenimiento del equipo	59
III	Listado de señales en diseño de automatización	65
IV	Componentes del PLC	67
V	Listado de materiales para panel de operador	75
VI	Costos de la automatización del equipo	83
VII	Datos generales para análisis de gasto de combustible	85
VIII	Pérdidas de energía debido a depósitos de incrustación	
	En calderas	101
IX	Información de caldera	103

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
BTU	Unidad térmica británica
CaCO ₃	Carbonato de Calcio
Ca ⁺²	Ion Calcio
CPU	Unidad central de proceso
°C	Grados centígrados
cm	Centímetro
VDC	Voltaje de corriente directa
gpm	granos por galón
gal	Galón
hr	Horas
lbs	libras españolas
min	Minuto
Mg ⁺²	Ion Magnesio
ppm	Partes por millón
PLC	Control lógico programable
psi	libras por pulgada cuadrada
PVC	Cloruro de polivinilo

Q	Unidad de moneda Quetzales
TDS	Sólidos disueltos totales
VAC	Voltaje de corriente alterna
Π	Constante Pi (3.14159265)
%	Porcentaje

GLOSARIO

BTU

Término proveniente del inglés: *British thermal units per tour*, es decir, unidades térmicas por hora; se define como la cantidad de energía térmica que se necesita para elevar en 1 °F la temperatura de 1 libra de agua.

Compensación

Característica del modo de control automático integral, representa la diferencia entre el punto de ajuste original y un nuevo punto de ajuste de una variable controlada dentro de un proceso automático, luego de un cambio brusco en otras variables que afecten a la controlada.

Dureza

Es la presencia de sales de calcio y magnesio en el agua. La dureza disminuye la capacidad del jabón de producir espuma. Una alta dureza causa problemas de incrustación en calderas y tuberías e interfiere en procesos de purificación por osmosis inversa.

Error

Diferencia entre el valor del resultado real, obtenido, de la medición de una variable controlada y el valor predefinido de esta en el punto de ajuste.

Granos por galón

Antiguamente, unidad para expresar la dureza del agua; actualmente, utilizado para expresar la capacidad de intercambio iónico, en las resinas para dicho fin, 1 grano por galón es equivalente a 17.12 ppm. Su abreviatura es gr/gal.

Micra	Unidad de longitud que se le conoce formalmente como micrómetro, que se simboliza con μm , es la letra griega "mu", y que es una milésima parte de un milímetro.
Manómetro de Bourdon	Instrumento que se utiliza para medir la presión en un circuito hidráulico, el cual dispone de un tubo en forma de arco, el cual cuando se aplica presión al agujero de entrada, tiende a enderezarse, accionando un acoplamiento que gira un engranaje y una aguja ligada a este que indica la presión en un cuadrante.
Partes por millón	Una de las unidades de medición mas comunes en el análisis de agua, en soluciones muy diluidas, como es el caso de las aguas naturales, es equivalente a mg/l, dicho de otra forma representa el número de unidades de peso o volumen de un componente menor presente en cada millón de unidades de una solución o mezcla.

PLC

Siglas que significan Programmable Logic Controller, control lógico programable, utilizado en los sistemas automáticos de control, es una computadora especializada en las tareas que normalmente se requieren en los procesos industriales.

Punto de Ajuste

También, llamado set point, representa el valor que se quiere mantener en una variable controlada dentro de un sistema de control automático de un proceso industrial o domestico.

Punto de fuga

Momento en que la resina de intercambio iónico de un suavizador está completamente saturada de iones que se retienen del agua tratada, y en el cual se debe iniciar la regeneración de dicha resina.

PVC

Cloruro de polivinilo, polímero termoplástico sintético, resistente al tiempo y a la humedad, dimensionalmente estable y resistente a la mayoría de ácidos, grasas, hidrocarburos y hongos.

Resinas

Son pequeñas esferas de materiales plásticos. Las resinas de intercambio catiónico, están hechas de estireno y divinilbenceno y contienen grupos de ácido sulfónico, intercambian iones H^+ por cualquier cation que encuentren. Similarmente, las resinas aniónicas, tienen grupos de amonio cuaternario, que intercambiaran cualquier anión por iones OH^- .

Salmuera

Solución salina muy concentrada, convencionalmente superior a 100 000 mg/l, producida a menudo por evaporación o congelación del agua del mar.

Sensor

Dispositivo formado por células sensibles que detecta variaciones en una magnitud física y las convierte en señales útiles para un sistema de medida o control, generalmente, señales eléctricas.

Señal Analógica

Cuando las magnitudes de la misma se representan mediante variables continuos, esto es análogas a las magnitudes que dan lugar a la generación de esta señal. Generalmente, en automatización, son señales de corriente eléctrica que varían entre 0 a 20 mili amperios.

Señal digital	Señal que tiene magnitudes que representan valores discretos en lugar de variables continuas. Por ejemplo, el interruptor de la luz (señal: resistencia eléctrica) – sólo puede tomar dos valores: 0 ó 1.
Sólidos disueltos totales	Es la concentración total de iones disueltos, expresada en unidades de conductividad, S/cm o en ppm de NaCl o de Na ₂ SO ₄ .
Sólidos suspendidos	Son los sólidos no disueltos y que pueden ser removidos por filtración.

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla un diseño de la automatización de una planta de tratamiento de agua para relleno de una caldera de 60 HP, pirotubular, utilizada como fuente de vapor de agua en los procesos productivos de una fábrica de dulces.

Se analizó la operación y los resultados del desempeño de la planta de tratamiento actual que consiste en un filtro de arena y un suavizador. Posteriormente, se propuso un diseño para su automatización, el cual incluye cantidad, tipo y ubicación de los accesorios a utilizar, así como una descripción del funcionamiento de la planta en el momento en que se aplique dicho diseño.

Por último, se evaluó el costo de inversión para ejecutar el diseño propuesto, valor que asciende a Q 69,163.00, y, se comparó con el ahorro que podría lograrse, el cual es de, aproximadamente, Q 44,970.40 por año; la inversión inicial se puede recuperar en un periodo de 18.5 meses haciendo económicamente viable este proyecto.

OBJETIVOS

General

Diseño de la automatización de una planta de tratamiento de agua de una fabrica de dulces.

Específicos

1. Aplicar los conceptos de diferentes modos de control automático de equipos y procesos a un sistema de tratamiento de agua.
2. Proponer los equipos necesarios para el diseño de la automatización de la planta de tratamiento de agua.
3. Proporcionar una propuesta de aseguramiento para la calidad de agua, en una fabrica de dulces.
4. Impulsar con este trabajo, la aplicación de la automatización de procesos, en los profesionales de ingeniería química.

INTRODUCCIÓN

Los equipos generadores de vapor, llamados, comúnmente, calderas, son indispensables en muchos procesos productivos, pues son ellos los que proporcionan el vapor necesario para la realización de diferentes etapas en los mismos.

Estos equipos son costosos y requieren de un buen manejo en su operación para que puedan ser eficientes y que su vida útil no se vea reducida. Entre los puntos importantes para su buen funcionamiento se encuentra la calidad del agua con que se alimenta a estos equipos, y, dentro de los parámetros de calidad más importantes a controlar, está la dureza de la misma.

El agua para la operación de la caldera, puede provenir de la recolección de los condensados del proceso productivo, mas agua tratada en un suavizador, o, solamente de un suavizador, pero está última opción no es muy económica, pues requiere de desgaste muy grande para el equipo suavizador.

El primer caso es el que se da, generalmente, en los procesos productivos.

La fábrica de dulces donde se encuentra el equipo a que se refiere el presente trabajo, manufactura golosinas de gelatina y malvaviscos y tanto en los cocimientos de las mieles que son la base de dichos productos, como en su posterior secado y recubierto con algunos aditivos, se necesita vapor de agua como medio de calentamiento. Para generar este vapor, la fabrica, cuenta con una caldera pirotubular, la cual es alimentada con agua de condensados, provenientes del proceso productivo, como, también, del agua proveniente de un equipo que le proporciona un tratamiento de filtrado y suavización.

Este trabajo tiene como objetivo diseñar la automatización del equipo que se menciona, para garantizar que la dureza del agua que llega a la caldera se encuentre en valores adecuados para la misma y con ello minimizar los riesgos de un problema mayor en el procesos de manufactura, que repercuta en el producto final y que sea originado por un daño en el sistema de generación de vapor.

Este estudio será llevado a cabo con el estudio y análisis de:

La metodología actual del funcionamiento y mantenimiento del equipo suavizador y de la forma en que se realizan las mediciones de dureza del agua tratada por el mismo, para comprender su correcto funcionamiento.

Los diferentes tipos de modos de control automáticos que existen para seleccionar los que se puedan aplicar al equipo en cuestión.

La propuesta de la automatización del equipo, con diagramas de proceso y del equipo y costo del proyecto, para que pueda evaluarse su factibilidad.

1. Sistemas generadores de vapor

1.1 Usos

Los equipos generadores de vapor son comúnmente llamados calderas, y tienen como función primordial producir vapor de agua, al cual se le dan un sin fin de usos a nivel domestico e industrial.

La mayoría de las Industrias y muchos establecimientos comerciales necesitan vapor. El vapor es empleado en las fábricas textiles para producir, formar y teñir los productos. Las tintorerías emplean vapor para planchar la ropa. Las compañías empacadoras y de alimentos emplean vapor para cocinar y procesar alimentos. Las panaderías preparan el pan con vapor. Las cervecerías emplean vapor para producir la cerveza. Las calderas son frecuentemente empleadas para calentar agua en hoteles, hospitales, lavanderías y grandes construcciones. Estas operan muchas de las Turbinas empleadas para producir energía eléctrica. Como regla general, las grandes fábricas u operaciones industriales, son los más adecuados lugares que hay para buscar uno o más generadores de vapor en operación.

1.2 Estructura y tipos

La mayoría de las calderas o generadores de vapor tienen muchas cosas en común. Normalmente en el fondo esta la cámara de combustión u horno, en donde es más económico introducir el combustible a través del quemador en forma de flama. El quemador es controlado automáticamente para pasar solamente el combustible necesario para mantener la presión deseada en el vapor. La flama o el calor es dirigido o distribuido a las superficies de calentamiento, que normalmente son tubos, o serpentines. En algunos diseños el agua fluye a través de los tubos o serpentines y el calor es aplicado por fuera, este diseño es llamado “calderas de tubo de agua”. En otros diseños de calderas, los tubos o serpentines están sumergidos en el agua y el calor pasa en el interior de los tubos, estas son llamadas “calderas de tubos de humo”. Si el agua es sujeta también a contacto con el humo o gases calientes más de una vez, la caldera es de doble, triple o múltiples pasos.

El agua calentada se levanta de la superficie del agua, se vaporiza y es colectada en una o varias cámaras o tambores. El tamaño del tambor determina la capacidad de producción de vapor. En la parte superior del tambor de vapor se encuentra la salida o el llamado “cabezal de vapor”,

desde donde el vapor es conducido por tuberías a los puntos de uso. En la parte superior del hogar mecánico se encuentra una chimenea de metal o de ladrillo, la cual conduce hacia fuera los productos de la combustión como gases. En el fondo de la caldera, normalmente opuesto al tambor de vapor, se encuentra una válvula de salida llamada “purga de fondo”. Por esta válvula salen del sistema, la mayoría del polvo, lodos y otras sustancias no deseadas, que son purgadas de la caldera y donde especialmente se controla la calidad de agua de la caldera.

En conjunto a la caldera existen múltiples controles de seguridad, para aliviar la presión si esta se incrementa mucho, por medio de una válvula de salida de vapor por alta presión, como también, para apagar la flama si el nivel del agua es demasiado bajo o para automatizar el control de nivel del agua. Un tubo de vidrio con una columna de agua generalmente se incluye, para mostrarle al operador el nivel físico interno del agua en la caldera.

1.3 Agua de alimentación

El agua de alimentación a la caldera es comúnmente almacenada en un tanque, con capacidad suficiente para atender la demanda de la

caldera, una válvula de control de nivel mantiene el tanque con agua, una bomba de alta presión empuja el agua hacia adentro de la caldera, se emplean bombas de presión debido a que generalmente las calderas operan a presiones mucho mas elevadas que las que encontramos en los tanques de agua.

Vapor limpio, es agua pura en forma de gas. Es importante por economía y calidad de agua de la caldera, mantener un ciclo cerrado del sistema de vapor, esto se da cuando este vapor se enfría y condensa en agua pura, normalmente conocida como “condensados”. Normalmente estos condensados, contienen una gran cantidad de calor que puede ser recuperado. Estos condensados son casi perfectos como alimentación a la caldera una vez que ha sido desgasificados para eliminar los gases disueltos, como el oxígeno, para luego ser retornados a la caldera, con lo cual se completa el ciclo cerrado de generación y uso del agua.

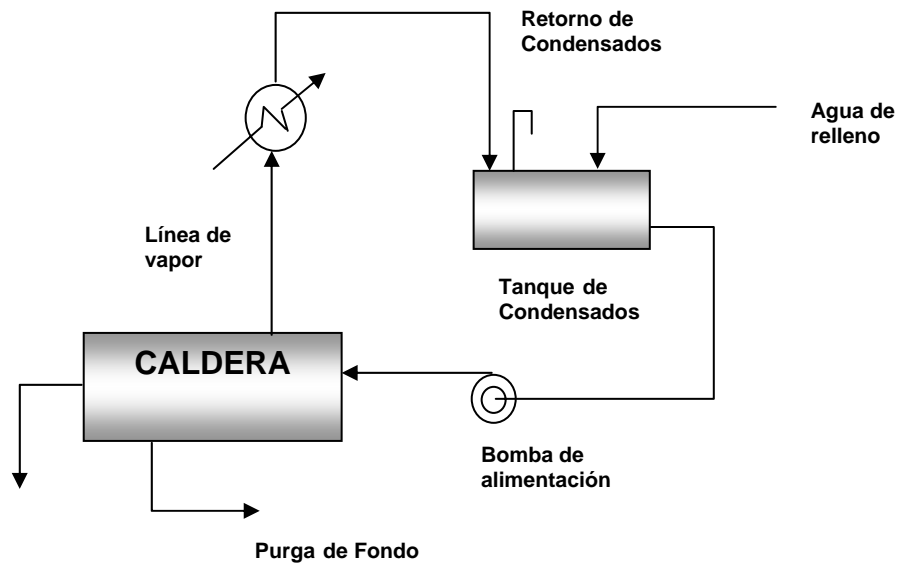
Esto es posible, siempre y cuando, los condensados son retornados a la caldera y colectados en un tanque conocido como “tanque de condensados”. Cuando el condensado es recuperado en un tanque de este tipo, generalmente se elimina del diseño el tanque de agua de alimentación.

Existen dos fuentes de agua de alimentación para calderas: el retorno de condensados y el agua de relleno.

En algunas instalaciones, el retorno de condensados puede llegar a ser del 99%, casi supliendo el agua de relleno. A mayor porcentaje de recuperación de condensados será menor el agua de relleno a la caldera. Hay otras instalaciones que probablemente requieran emplear el 100% de agua de relleno, esto puede ser por varias razones, como que el condensado no se pueda recuperar o que el condensado este contaminado por alguna parte del proceso o que el proceso de producción, necesite vapor vivo, por ejemplo en el cocimiento de carnes.

A continuación se presenta una figura donde se muestra toda esta estructura de uso del agua para alimentar calderas:

Figura 1. Diagrama de flujo agua vapor



Fuente: SISTEAGUA, *Calidad de agua para generadores de vapor*, Pág. 2

El agua de alimentación de calderas, necesita pre tratamiento externo, dependiendo del tipo de caldera, la presión de operación, o del sistema total. Tratamiento químico interno es necesario, dependiendo del tratamiento externo del agua. El tratamiento externo del agua reduce la dosificación de productos químicos y los costos totales de operación. Equipos de intercambio iónico y filtración reducen la dureza total en el agua y los sólidos suspendidos respectivamente y ambos procesos conforman tratamientos externos del agua de alimentación de calderas.

1.3.1 Sólidos disueltos

Cuando el agua es evaporada y se forma vapor, los minerales o sólidos disueltos y suspendidos en el agua, permanecen dentro de la caldera. El agua de relleno contiene una carga normal de minerales disueltos, estos hacen que se incrementen los sólidos disueltos totales dentro de la caldera. Después de un periodo de tiempo los sólidos disueltos totales (TDS) alcanzan niveles críticos dentro de la caldera. Estos niveles en calderas de baja presión se recomienda que no excedan 3500 ppm (partes por millón o miligramos por litro) . TDS por encima de este rango pueden causar espuma e incrustaciones en la tubería, lo que va a generar arrastres de altos contenidos de TDS en las líneas de vapor, las válvulas y las trampas de vapor. El incremento en los niveles de TDS dentro de la caldera es conocido como “ciclos de concentración”, este término es empleado muy seguido en la operación y control de la caldera. Agua de alimentación que contiene 175 ppm de TDS puede ser concentrada hasta 20 veces para alcanzar un máximo de 3500 ppm .

En calderas de mayores presiones de operación los límites de TDS disminuyen en relación a la presión de operación.

Para controlar los niveles máximos permisibles de TDS, el operador debe de abrir en forma periódica la válvula de purga de la caldera. La purga es el primer paso para el control del agua en la caldera y esta debe de ser en periodos o intervalos de tiempo. La frecuencia es dependiendo la cantidad de TDS en el agua de relleno y de la cantidad de agua de reposición introducida, así como también del diámetro de la válvula y la presión de la misma caldera. En calderas grandes o más críticas, las purgas deben de ser automáticas o continuas.

1.3.2 Dureza Total

La formación de incrustación en las superficies de la caldera es el problema mas serio encontrado en la generación de vapor.

La primera causa de la formación de incrustación, es debido al hecho de que la solubilidad en agua de las sales, decrece a medida de que se incrementa la temperatura, aumentando la facilidad de precipitación. Consecuentemente, en la alta temperatura y presión en la operación de las calderas, las sales se vuelven mas insolubles, la precipitación o incrustación aparece. Esta incrustación puede ser prevenida de ser formada en las calderas, mediante el empleo de un

tratamiento externo, en el cual generalmente se utiliza un equipo llamado suavizador.

Como sea, para alcanzar un alto grado de eficiencia, se recomienda el control de la dureza antes de entrar a la caldera, el suavizador en si mismo es un medio muy adecuado para proteger a la caldera de incrustación. El uso de tratamientos internos, productos químicos, son empleados como complementos, para mantener un control de la incrustación en la caldera, altamente efectivo.

En todos los casos, se tendrá un pequeño remanente de dureza en el agua de alimentación a la caldera, incluso en el agua suavizada, además de encontrar otras sales presentes. Por lo tanto, el uso de productos químicos para el tratamiento de la caldera es necesario. La presencia de incrustación en la caldera es equivalente a extender una pequeña capa de aislamiento a lo largo y en toda el área de calentamiento, este material aislante térmico va a retardar y/o impedir la transferencia del calor, causando perdidas de eficiencia en la caldera, por lo tanto incrementa el consumo de energía.

Un estudio realizado por la WQA, Water Quality Association, en 1980 en calentadores convencionales residenciales, demostró un efecto

muy significativa en la eficiencia de transferencia de calor, cuando la incrustación estaba presente. La incrustación presente en esos sistemas resulto en un consumo adicional del 22% en BTU's en unidades operadas con gas y en un 17% en unidades operadas con electricidad.

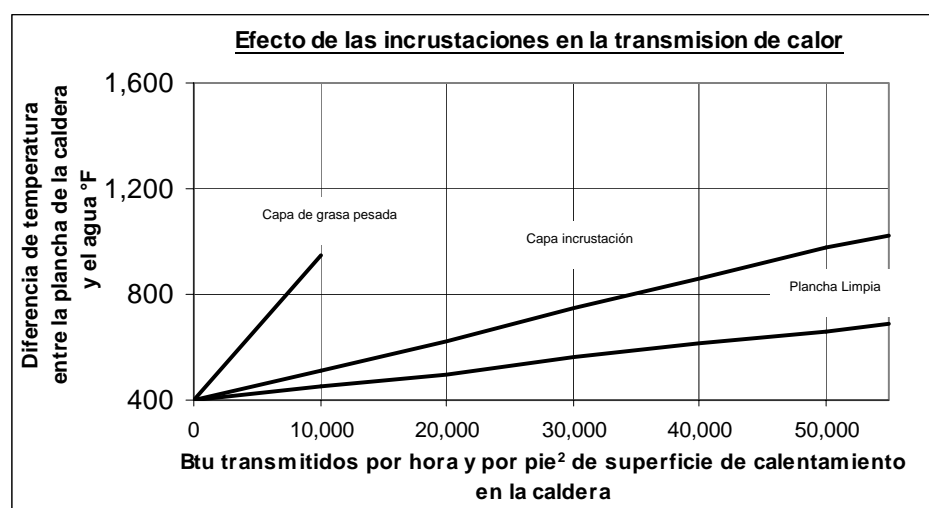
Además mas importante que el efecto de perdida en la transferencia de calor e incremento en consumo de energía, es que la incrustación puede causar un sobre calentamiento en el metal de los tubos de la caldera, generando fallas de rompimiento en los tubos. Este problema requiere una costosa reparación, además de tener que sacar a la caldera del servicio. En las calderas modernas con alta eficiencia de transferencia de calor, la presencia e incluso extremadamente delgada de incrustación, puede causar una muy seria elevación de la temperatura en los tubos de metal. La cubierta de incrustación retarda el flujo de calor del horno hacia el agua para generar vapor, esta resistencia al calor resulta en un rápido incremento en la temperatura del metal al punto en donde se presenta la falla. El posible daño causado en la caldera no es solo costoso, además es muy peligroso debido a que la caldera opera a presión.

La presencia de cualquier tipo de incrustación en la caldera debe de ser considerada de mucha importancia. La incrustación puede ser

prevenida de formarse en las calderas de forma interna, productos químicos y/o externa, suavizador. Como sea, el tratamiento interno solo es más costoso y se incrementa a elevados rangos de dureza. El uso de un suavizador de agua en conjunto con un tratamiento químico es más efectivo, confiable, seguro y económico, significa control de la calidad del agua en una caldera.

En la gráfica siguiente se presenta el gran efecto que las incrustaciones dentro de la caldera tienen, en la eficiente transferencia de calor, en este caso presentado por la diferencia de temperaturas, entre el agua y las paredes de transferencia de calor del equipo.

Figura 2. Efecto de la incrustación en la transferencia de calor en calderas



Fuente: ICAITI, Mejoramiento de la eficiencia de operación de calderas de vapor,

pag 143

Es muy importante conocer que la dureza máxima permitida en cualquier caldera, debe de ser prácticamente cero ppm.

La dureza en el agua esta formada de iones calcio y magnesio, la dureza en diferentes fuentes naturales de agua puede variar en forma muy considerable, depende de cada tipo de fuente de donde el agua es obtenida. Algunas zonas se tienen formaciones de piedra caliza, el agua generalmente tiene alto contenido de dureza. El agua superficial esta generalmente diluida con agua de lluvia, el agua de la lluvia que cae en la tierra, se va filtrando pasando por diferentes capas de la tierra, en muchas de ellas va diluyendo sales y generando dureza.

El grado de dureza en cada lugar nunca deberá de ser asumida. Se debe de hacer todo el esfuerzo posible para obtener un análisis del agua en el lugar en donde se va a tomar el agua que alimentara a la caldera y su suavizador.

Muchos de los análisis del agua expresan la dureza en “partes por millón” (ppm) . Las partes por millón pueden convertirse a “granos por galón” (gpg) , que es otra medida también usada para esta variable. Para convertir la dureza expresada en ppm a gpg hay que dividir los ppm entre 17.1.

Gpg significa cuantos granos de resina de intercambio iónico se necesitan para suavizar un galón de agua, en un suavizador.

2. Sistemas de control automático de procesos

2.1 Principios básicos de sistemas de control

El propósito de cualquier sistema de control es mantener una o más variables de un proceso de producción dentro de valores deseados. Por ejemplo, mantener la presión en una línea de vapor a 100 psi puede ser un elemento importante en una planta de generación de energía o lograr la temperatura en un horno a 350 °C, debe ser un aspecto importante en una industria pastelera. Aparte de la presión y la temperatura otros componentes de los procesos industriales son típicamente controlados, estos incluyen niveles de fluido y rangos de flujo, composición de los materiales, velocidad del motor y posiciones de brazos robóticas, entre otros muchos.

Antes de que alguna de estas variables pueda ser controlada, debe haber alguna forma para medirlas, aunque el equipo de medición deba medir la temperatura, la velocidad del motor o alguna otra variable, cuando son usados en sistemas de control, son conocidos colectivamente como sensores. Entonces el trabajo del sensor es monitorear la o las variables a controlar.

La señal es transmitida desde el sensor al comparador, el cual generalmente se encuentra físicamente dentro de otro equipo llamado controlador. El comparador determina si hay alguna diferencia entre los valores medidos por el sensor y el valor deseado. El valor deseado o punto de ajuste es usualmente referido como el *set point*. Alguna diferencia entre el valor medido por el sensor y el valor del punto de ajuste, es conocido como el error. Un error se considera positivo si el valor medido es muy bajo o negativo si este es muy alto, con respecto al punto de ajuste.

Cuando existe un error, el controlador detecta la magnitud de la señal de error, toma una decisión basada en el mismo, y transmite una señal al equipo de control final para corregir el error en la variable controlada.

Por ejemplo, el controlador puede llamar a un incremento en el flujo de gas cuando la temperatura de un horno de una pastelería esta bajo los 350 °C, siendo esta temperatura el punto de ajuste. En este caso el flujo de gas es la variable manipulada, y junto con esta acción del controlador, existirá un cambio en las variables manipuladas, causando como consecuencia el cambio en la temperatura que es la variable controlada.

El elemento de control final afecta directamente la variable manipulada, y por lo tanto indirectamente afecta a la variable controlada. En el horno de la pastelería por ejemplo, el elemento de control final es una válvula en la línea de gas que conduce este hacia el horno. Una señal desde el controlador abrirá, ajustara o cerrara la válvula. Este cambio causara el incremento o decremento de la temperatura en el horno, para retornar el sistema al punto de ajuste.

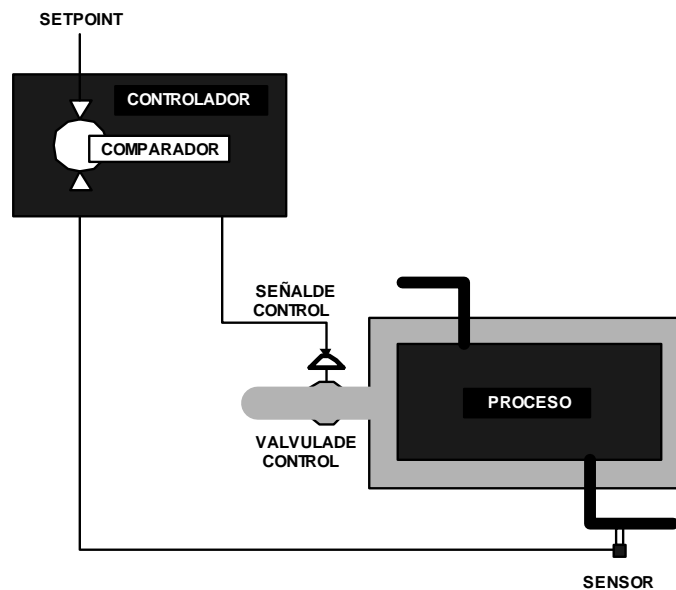
2.2 Retroalimentación del lazo del control

La mayoría de los sistemas de control están basados en el principio de retroalimentación del lazo de control. En la retroalimentación del lazo de control, la condición de un sistema es monitoreada por un sensor, el cual provee esta información al controlador, el comparador dentro del controlador, determina el valor de la señal de error. Basada en el valor de la señal de error, el controlador transmite una señal hacia el elemento final de control para cambiar el valor de la variable manipulada. El nuevo valor de la variable controlada es continuamente monitoreado por el sensor, cuya señal es alimentada en el sistema de control para completar la retroalimentación del lazo. De esta forma el

sistema de control actúa continuamente para mantener la variable controlada dentro de los límites aceptables.

Un ejemplo del lazo de retroalimentación es mostrado en la siguiente figura

Figura 3. Lazo de control con retroalimentación básica



Fuente: ISA, **Basic Automatic Process control**, Pág. 5

Las líneas son usadas para indicar la dirección en la cual las señales fluyen de un componente del sistema a otro. Cualquier cosa fluyendo hacia un componente es conocido como entrada y cualquier cosa fluyendo hacia afuera es conocido como salida, por ejemplo la

temperatura del horno es una entrada para el sensor, y la salida del sensor es una señal para el comparador, estas señales de entrada y salida son cantidades variables, por ejemplo, así como la temperatura del horno varíe, la señal de voltaje de salida del sensor también varia.

Los cuadros en la figura, representan las partes del equipo donde esas variables cambian de una forma de energía o flujo de materia a otra.

Por ejemplo, la entrada al elemento final de control es usualmente una señal electrónica o neumática. El valor de esta señal determina tanto la apertura como el cierre de la válvula. La excepción a esta regla son los cuadros que representan los comparadores, porque en este caso las entradas y salidas tienen la misma forma (generalmente son señales electrónicas o neumáticas). Los comparadores también difieren de los otros cuadros porque tienen dos entradas simultáneas. Generalmente una entrada es el punto de ajuste; la otra es el valor de la variable controlada. En los comparadores, una entrada es sustraída de otra para determinar el error.

Aunque los sistemas varíen en complejidad, todos pueden ser representados usando este simple método de conexión de cuadros con líneas y flechas.

2.3 Tipos de sistemas de control

2.3.1 Control Encendido/apagado

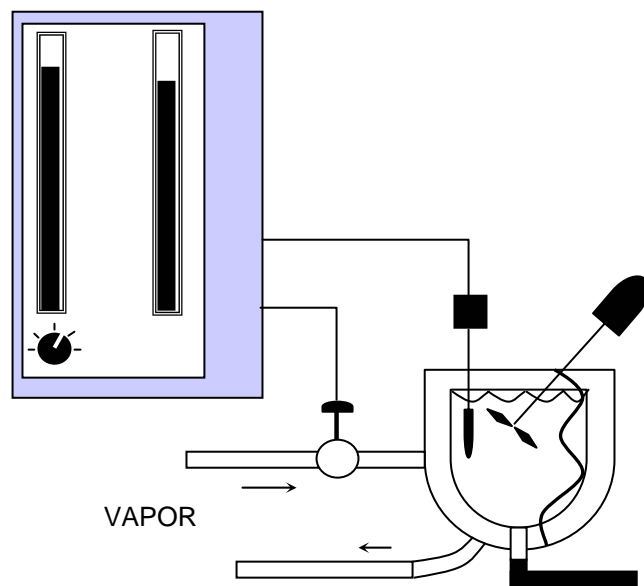
El tipo más simple de sistema de control usa un controlador Encendido/Apagado. Este controlador actúa como un interruptor, variando el elemento de control final en encendido o apagado, dependiendo del valor de la señal de error. En este sistema el elemento de control final solo tiene dos posiciones encendido o apagado. No existen posiciones intermedias, tales como medio encendido o medio apagado.

Un sistema de calefacción casero, comprendido por un termómetro ordinario conectado a un horno, es el ejemplo más común de un sistema de control encendido/apagado. Cuando la casa se enfría, el horno se enciende y una vez que la casa se calienta otra vez, el horno se apaga. En este sistema el termostato montado en la pared contiene el sensor, el comparador y el controlador. El elemento de control final puede ser una

válvula de gas o aceite o un retransmisor eléctrico, que es localizado en o cerca del horno.

Un ejemplo del controlador encendido/apagado en la industria es mostrado en la siguiente figura

Figura 4. Proceso por lotes y controlador



Fuente: ISA, **Basic Automatic Process control**, Pág. 6

Aquí, un producto líquido es hecho por lotes, combinando varios productos químicos en un reactor. El reactor es rodeado por una camisa de vapor, porque el producto debe ser calentado a 80 °C para asegurar la

mezcla completa, este valor, es el valor deseado en el sistema o punto de ajuste. La temperatura del producto, es la variable controlada del sistema.

El sensor de temperatura es localizado dentro del producto, y su señal de salida es transmitida al controlador. El controlador contiene el comparador y produce la señal para abrir o cerrar la válvula de vapor cuando sea necesario. Como resultado esta válvula se abrirá cuando la temperatura del producto este bajo los 80 °C (valor deseado) y se cerrara cuando la temperatura este sobre ese valor.

Un controlador encendido/apagado causa, que los valores de la variable controlada se mantenga en un ciclo alrededor del valor deseado. El rango a través del cual la variable controlada oscila, depende de la dinámica del sistema. Por el ejemplo, variando el abastecimiento de agua caliente, en una tina llena de agua, causara solo un pequeño cambio en la temperatura de toda el agua contenida en ella, pero ese mismo cambio causara que la temperatura del agua pueda cambiar de muy caliente a muy fría, en una ducha eléctrica.

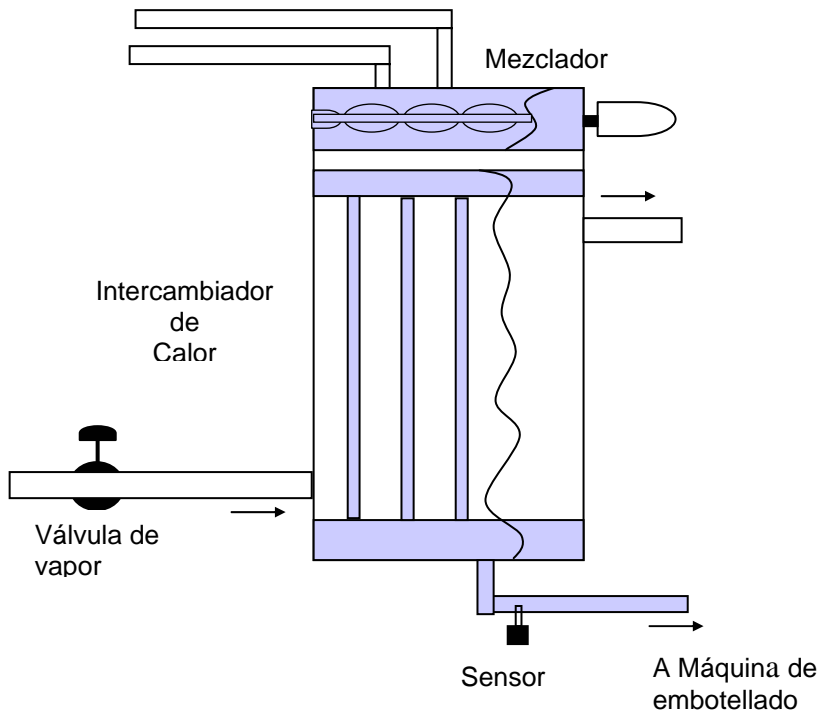
Los controladores encendido/apagado generalmente son usados tanto en procesos que responden lentamente a cambios en la variable

manipulada, como en casos donde la variable controlada puede tolerar alguna desviación con relación al punto de ajuste.

2.3.2 Modo Proporcional

Para controlar procesos que responden rápidamente a cambios en la variable manipulada o esos que requieren preciso control de la variable controlada, es necesario tener mas que solo un control de encendido/apagado. Por ejemplo en un proceso de producción continua calentado por vapor, como el que se muestra en la siguiente figura

Figura 5. Proceso continuo



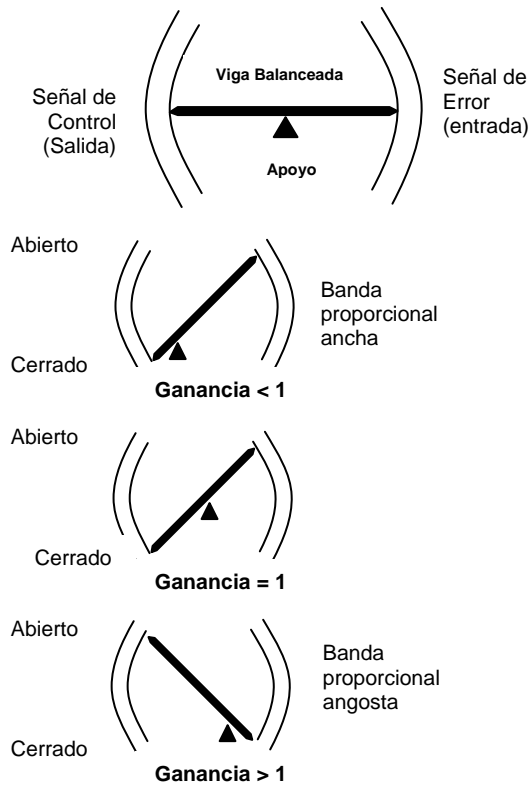
Fuente: ISA, **Basic Automatic Process control**, Pág. 8

El flujo de vapor debe ser regulado ajustando las válvulas de control de tal forma que el mismo logre exactamente la temperatura en el valor deseado. Esto significa que la válvula de control debe ser ajustada en alguna posición entre completamente abierto y completamente cerrado. El sistema de control puede entonces hacer ajustes a la posición de apertura de la válvula, entre cerrado y abierto para corregir variaciones con relación al valor deseado.

El ajuste del elemento final del control a posiciones entre completamente abierta y completamente cerrada es logrado por un controlador con una acción proporcional. Entonces el controlador provee una señal que es proporcional a la señal de error: un error muy grande ocasionara una señal grande hacia el elemento final de control y viceversa.

La acción de controlador proporcional es similar a la acción de una viga balanceada, mostrada en la figura siguiente

Figura 6. Acción del control proporcional



Fuente: ISA, **Basic Automatic Process control**, Pág 9

Un extremo de la viga se mueve para corresponder con la señal de error, y el otro extremo representa la señal de control, que se mueve, en una cantidad que depende de la posición del punto de apoyo de la viga. Si el punto de apoyo está en el centro, el tamaño de la señal de control será exactamente igual a la señal de error. En este caso decimos que la amplificación o la ganancia es ajustada al número uno. Si el punto de apoyo es movido hacia la derecha la señal de control será más grande

que la señal de error y la ganancia será mayor que uno. Si el punto de apoyo es movido hacia la izquierda la señal de control será mas pequeña que la señal de error, y la ganancia será menor que uno.

El tamaño de la señal de control para una señal de error dada, depende del ajuste de ganancia del modo proporcional del controlador.

Con un ajuste de ganancia alto, una señal de error relativamente pequeña debe mover una válvula (u otro elemento final de control) al final de su rango, completamente abierto o completamente cerrado. Una subsiguiente señal grande de error no tendrá efecto sobre la posición de la válvula. Esto significa que la posición de la válvula será proporcional a la señal de error, solo en un rango pequeño. Entonces decimos que la banda proporcional es angosta. En contraste, con un ajuste bajo de ganancia, una señal de error debe producir solo un leve ajuste a la válvula. Una muy grande señal de error debe ser necesaria para tener un movimiento muy grande en la válvula y la válvula nunca debe alcanzar la posición de completamente abierta o completamente cerrado. En este caso decimos que existe una banda proporcional ancha.

Altas ganancias equivalen a bandas proporcionales angostas; bajas ganancias equivalen a bandas proporcionales anchas.

La banda proporcional es la cantidad de cambios de entrada que se requieren para causar un cambio del 100% en la salida.

El ajuste de la ganancia en un controlador proporcional, permite el control de la acción para ajustar un proceso. Si la variable controlada tal como la temperatura se aleja del punto ajustado y retorna lentamente a ese punto, esto significa que la ganancia es demasiado baja y la válvula de vapor no esta siendo abierta lo suficientemente amplia para proveer la cantidad de vapor requerida. Por otra parte si un cambio pequeño en la cantidad controlada, hace que la válvula de vapor sea abierta demasiado, demasiado calor adicional será agregado y la temperatura se disparara. Esto significa que la ganancia ajustada es demasiado alta. En efecto una muy alta ganancia ajustada, causara que el controlador actúe como un controlador de encendido y apagado.

2.3.3 Modo Integral

Un cambio grande en la carga o volumen de un sistema causara que la variable controlada experimente un cambio fuerte desde el valor deseado. Por ejemplo si el flujo de material a través de un intercambiador de calor es incrementado, la temperatura del material,

caerá antes de que el sistema de control pueda ajustar la entrada de vapor para la nueva carga. Como el cambio en el valor de la variable controlada disminuye, la señal de error se convierte en menor y la posición del elemento de control se acerca el punto requerido para mantener un valor constante. De cualquier forma el valor constante no será el valor deseado, entonces habrá una compensación.

La compensación es una característica del control proporcional. Considerando por ejemplo, un tanque en el cual el nivel del agua es controlado por un flote. El sistema estabiliza cuando el nivel del agua, esta en la posición tal que causara la apertura de la válvula lo suficiente para que el agua fluya balanceando el agua que esta fluyendo hacia fuera. De cualquier manera la válvula de flujo de salida es abierta manualmente por lo que al mismo tiempo que el agua fluye fuera del tanque, el nivel en el tanque se estabilizara en un nuevo nivel mas bajo. Este nuevo nivel bajo, será el único que cause que la válvula se abra por la cantidad adicional necesitada para obtener el balance entre la entrada y la salida. La diferencia entre el viejo nivel (valor deseado) y el nuevo nivel es la compensación.

La acción integral es agregada a la acción proporcional para vencer la compensación. Esto responde a la señal de error del sistema de

retroalimentación, y esto lo hace la acción proporcional, pero este tiempo es la duración de la señal de error, que es importante, no solo su magnitud. En efecto una unidad monitorea el promedio de error entre cada periodo de tiempo. Entonces en el evento de una compensación, la unidad integral detectara que el error aunque constante aún existe después de algún tiempo. Este continuara moviendo la acción de la unidad proporcional para corregir el error o la compensación.

En términos matemáticos, la unidad integral computa el área de la curva despidiendo la cantidad de error en el tiempo. Este cómputo envuelve la operación matemática conocida como integración, y es el resultado de este cómputo que determina si la acción proporcional es o no afectada. Esto es el proceso de integración que da a la acción integral su nombre.

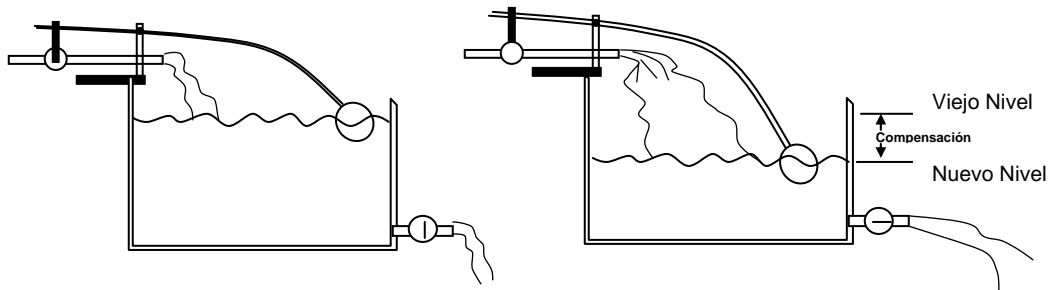
En términos no matemáticos, la unidad integral monitorea la ejecución de la unidad proporcional. Si está encuentra que existe una compensación, esta desvía o reajusta la acción del control proporcional. Es por esta habilidad para retornar de un sistema a su valor deseado, que la acción integral es también conocida como acción de reajuste.

Los ajustes de los controladores deben ser identificados como reajuste. Estos ajustes cambian la frecuencia con la cual la unidad integral reajusta la unidad proporcional, y esta frecuencia puede ser expresada como repeticiones por minuto o minuto por repetición.

Con esto, el técnico ajusta un valor de tiempo que multiplica la integral del error para incrementar la ganancia efectiva del controlador. La capacidad del controlador continúa incrementándose hasta que el error ha sido vencido y la variable medida retorna al valor deseado.

Una unidad integral es comúnmente usada en conjunción con una unidad proporcional y las dos juntas son referidas como un controlador PI. Como este controlador contiene dos modos de control es también llamado como controlador de dos modos.

Figura 7. Cisterna, analogía para compensación



Fuente: ISA, **Basic Automatic Process control**, Pág 12

2.3.4 Modo Derivativo

Mientras un controlador PI puede ayudar a eliminar una compensación, esto incrementará el tiempo de respuesta y causará disparos más grandes que el control proporcional. El control integral es usado para vencer la compensación pero frecuentemente los cambios de carga o volumen causan que la variable controlada oscile fuera de los límites aceptables, antes de que el elemento de control pueda ser ajustado lo suficiente para poder hacer las correcciones. Lo que se requiere entonces es un modo de control que responda específicamente a cambios rápidos en la señal de error. Dicha acción de control puede anticipar esencialmente un error que podría exceder los límites aceptables, basado en el cambio de error.

Este tipo de acción de control es conocido como derivativo, la acción derivativa provee una señal proporcional al rango de cambio de la señal de error. Por lo tanto cuando la variable controlada es constante, la señal derivativa es cero. Cuando el valor de la variable controlada varía rápidamente, la señal derivativa es grande. La señal derivativa cambia el rendimiento del controlador. En esta forma una gran señal de control es producida cuando hay un cambio rápido en la variable controlada y en la variación, el elemento de control final recibe una fuerte señal de entrada, el siguiente resultado es una rápida respuesta a los cambios de carga o volumen.

En términos matemáticos la acción derivativa es basada en la inclinación de una curva que representa la cantidad de error en el tiempo, la operación matemática para determinar esta inclinación en cualquier instante particular en el tiempo, es conocida como encontrar la derivada. Esta es la operación que da al control derivativo su nombre. Debido a que esta derivada o inclinación, también corresponde al rango de cambio de la señal de error, la acción de control derivativa es también conocida como rango de acción.

El ajuste para la acción derivativa es llamado rango de ajuste. Si este es muy bajo, el sistema de control no responderá lo suficientemente rápido a los cambios de carga. Si el rango de acción es demasiado alto la respuesta incluso a cambios pequeños en la variable controlada será tan grande que el sistema de control se volverá inestable: en lugar de reducir progresivamente los errores en la variable controlada, los mezclará. El rango por lo tanto debe ser ajustado para cada sistema de control de tal forma que el sistema responda correctamente a los cambios de carga.

La acción derivativa es usada conjuntamente con las acciones proporcional e integral. El elemento de control resultante es conocido como controlador PID. Debido a que este contiene tres modos de control, el controlador PID es frecuentemente llamado controlador de tres modos.

Es importante enfatizar que los tres modos, así como también el simple controlador encendido/apagado, usan la misma señal de error, pero lo utilizan en formas diferentes:

- El modo de control encendido/apagado usa información acerca de la presencia del error.

- El modo proporcional usa información acerca de la magnitud del error
- El modo integral usa información acerca del promedio de error en un periodo de tiempo
- El modo derivativo usa información acerca del rango del cambio del error.

En todos los casos el objetivo es mantener la variable controlada tan cerca del valor deseado como se pueda.

2.4 El PLC

Un PLC se define como un controlador lógico programable, y las siglas por las que se le conoce, provienen de su nombre en ingles *Programmable Logic Controller*.

Este equipo utilizado en la automatización de procesos, es un tipo de computadora especializada en el tipo de tareas que ejecutan los comparadores y controladores de los sistemas tradicionales neumáticos y/o eléctricos de control automáticos.

Un PLC es un dispositivo usado entonces para controlar. Este control se realiza sobre la base de una lógica, definida a través de un programa que se define y guarda en el mismo.

Su uso permite la ventaja de cambiar la funcionalidad del control del proceso sin mas que cambiar el programa que contiene, ya que todas la actividades de comparación y acción hacia los elementos finales están implementados en el software interno del mismo. Además un solo PLC, puede manejar varios ciclos de control independientes o interrelacionados pues actúa como controlador y comparador de todos esos ciclos.

Los componentes de un PLC básico son los siguientes:

- Estante principal
- Fuente de alimentación
- CPU
- Tarjetas de entradas/salidas digitales
- Tarjetas de entradas/salidas analógicas

2.4.1 Estante Principal

El estante principal, es un elemento sobre el que se conectan el resto de los elementos, realmente es un soporte mecánico del equipo. En inglés se le llama *rack*.

2.4.2 Fuente de alimentación

La fuente de alimentación, es la encargada de suministrar la tensión y corriente necesarias tanto al CPU como a las tarjetas. La tensión de entrada es normalmente de 110/220 VAC de entrada y 24 DCV de salida que es con la que se alimenta a la CPU.

2.4.3 CPU

El CPU, también llamado unidad central de proceso, es el cerebro del PLC, consta de uno o varios microprocesadores, según el fabricante, que se programan mediante un software propio. Esta unidad es la encargada de ejecutar el programa almacenado en la memoria, ingresado por el usuario. Podemos considerar que toma una a una las instrucciones programadas por el usuario y las va ejecutando, cuando llega a final de la secuencia de instrucciones programadas, vuelve al

principio y sigue ejecutándolas de manera cíclica. Estas instrucciones pueden ser lecturas de señales provenientes de sensores, como también comparaciones de estas señales contra el valor deseado de alguna variable de proceso, y también alguna instrucción de acción sobre el elemento final de control de algún proceso.

2.4.4 Tarjetas de entradas y salidas

Las tarjetas de entradas y salidas comprenden la interfase entre el PLC y el sistema controlado, son como mínimo entradas y salidas lógicas, es decir capaces de tomar solo dos valores 1 y 0, abierto o cerrado, presente o ausente, llamadas señales digitales y pueden también, dependiendo de lo sofisticado de cada PLC, incluir entradas y salida analógicas, o sea capaces de tomara cualquier valor entre determinado máximo y mínimo. Es en estas tarjetas a donde llegan señales de sensores y de donde salen señales a elementos finales de control.

Estas tarjetas también se colocan junto al CPU en el estante principal.

3. Sistemas de tratamiento de agua

El tratamiento de agua para alimentación de calderas, conlleva varios procesos químicos o físicos para la adecuación de la calidad de la misma, minimizando que el contenido del agua provoque, problemas dentro de la caldera como incrustaciones, las cuales provocan pérdida de transferencia de calor, obstrucciones y hasta roturas de algunas partes de la caldera.

Dentro de estos procesos se encuentran, la filtración y la suavización, los cuales se presentan a continuación.

3.1 Filtración

Es un proceso de separación sólido líquido, que tiene como fin remover los sólidos suspendidos en el agua.

Los sólidos suspendidos finos son los que se eliminan con este proceso.

El proceso se lleva a cabo haciendo pasar el agua por un material que tenga espacios más pequeños que las partículas que se quieren remover, y así quedan atrapadas en él, permitiendo solo el paso del agua, que sale del proceso sin los sólidos suspendidos con que entro al mismo.

Existen muchos materiales que se utilizan en la filtración, entre ellos se puede mencionar membranas, telas de lana de vidrio, arena, enrejados y coladores. La decisión del material, dependerá del tamaño de partícula que se desee remover del agua.

3.2 Suavización

Se le conoce así al proceso químico de remover dureza del agua, es decir remover iones calcio, Ca^{+2} y magnesio, Mg^{+2} , de ella, que con su presencia en un agua que se utilice para una caldera, puede causar una serie de problemas por la incrustación que provocan.

Existen varias formas de suavizar el agua, sin embargo la forma más generalizada que se encuentra en la industria, es por medio del proceso de intercambio iónico.

3.2.1 Intercambio iónico

El intercambio iónico remueve de un agua cruda, sin tratamiento previo, los iones indeseables transfiriéndolos a un material sólido, llamado intercambiador iónico, el cual los acepta cediendo un número equivalente de iones de una especie deseable que se encuentra almacenada en el esqueleto del intercambiador de iones.

Existen varios materiales Intercambiadores iónicos, que van desde materiales orgánicos naturales tratados, hasta plásticos generados en laboratorios, todos ellos deben de cumplir algunas características, como ser insolubles en agua y de alta resistencia mecánica, entre otras. Comúnmente a los materiales que se utilizan en la suavización se les llama resinas de intercambio cationico.

El material intercambiador iónico tiene una capacidad limitada para almacenar iones en su esqueleto, llamada capacidad de Intercambio, en virtud de esto, llegara finalmente a saturarse con iones indeseables. Entonces el proceso continúa, con un lavado de este material con una solución fuertemente regeneradora que contiene a la especie deseable de iones, los que sustituyen a los iones indeseables acumulados, dejando al material de intercambio en condición útil nuevamente. Esta

operación es un proceso químico cíclico y el ciclo completo incluye retrolavado, regeneración, enjuagado y servicio.

El momento en que se necesita realizar este ciclo es llamado punto de fuga, que consiste en un aumento repentino y grande del valor de la dureza del agua que sale del proceso de suavización, y que indica la saturación del material con los iones indeseables.

El retrolavado consiste en hacer pasar agua en sentido contrario al que tiene en la función de servicio, con el fin de remover de la resina todo sólido suspendido que pudo quedar atrapado en ella y que puede provoca una minimización del área de contacto de la resina y con ello una disminución de su funcionamiento. Además reacomoda la resina dentro de su contenedor.

El enjuague, tiene como función eliminar todo exceso de solución regenerante del material de intercambio iónico, y se logra haciendo pasar por el agua suavizada.

4. Sistema de tratamiento de agua de la fabrica de dulces en estudio

4.1 Uso

El uso principal y único que se le da al sistema de tratamiento de agua en la fábrica de dulces en estudio, es el de suavización para agua de alimentación de las calderas que tienen en su planta de producción.

4.2 Descripción de equipo

El equipo en estudio está conformado por dos unidades interconectadas, una funciona como filtro rápido y otra como suavizador.

4.2.1 Filtro rápido

El filtro rápido está compuesto de un recipiente cilíndrico de fibra de vidrio reforzada, conteniendo arena de cuarzo y grava en disposición tal que funciona como un lecho filtrante. Este material es químicamente

inerte y por su granulometría tiene capacidad de retener sólidos suspendidos del orden de las 40 micras.

El agua que se filtra con esta unidad proviene de un sistema de agua potable por lo que se descarta que contenga sólidos suspendidos de tamaño mayor de 40 micras, por lo cual el dimensionamiento de esta unidad es suficiente para las necesidades de la planta.

4.2.2 Suavizador

Este equipo está realmente compuesto de dos unidades. El suavizador mismo y su tanque de solución regenerante (salmuera).

El primero contiene una carga de 10 pies cúbicos de una resina de intercambio cationico marca Amberlite IR-120 Plus. Según información del constructor, el equipo esta diseñado, para lograr una dureza de 0 en el agua tratada por el, sin embargo posee una llave de paso, que permite tener un valor deseado de dureza en el agua de salida del equipo.

Las dos unidades están construidas en fibra de vidrio reforzada y tienen forma cilíndrica.

Tanto el suavizador como el filtro de arena tienen una altura de 1.35 metros y un diámetro de 0.60 metros.

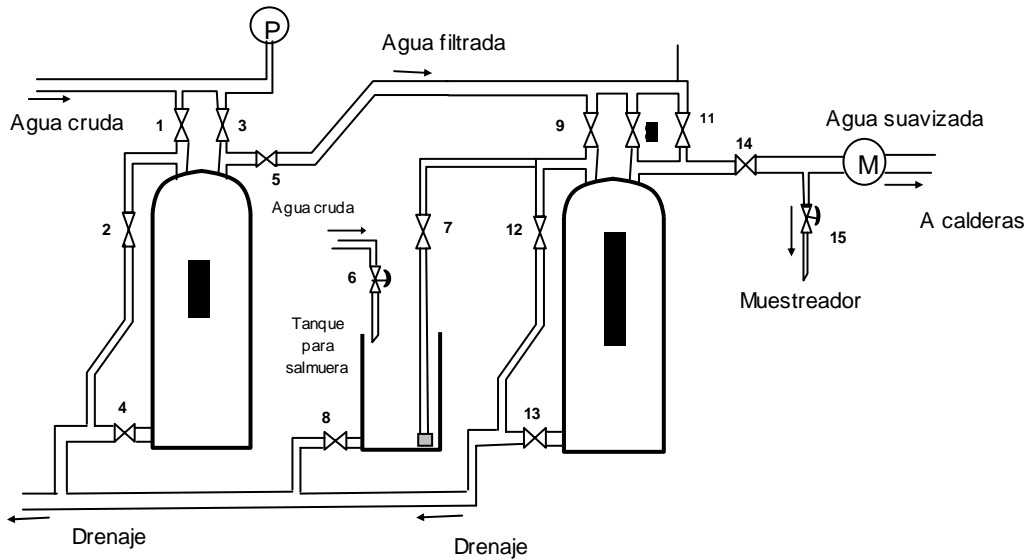
Mientras que el tanque para preparación de la solución regenerante tiene una altura de 1.05 metros y un diámetro de 0.50 metros.

4.2.3 Conexiones y accesorios

Los equipos están interconectados por tubería de PVC de 1 ¼ de pulgada diámetro nominal, llaves metálicas con accionamiento abierto-cerrado de la misma medida, un contador volumétrico en metros cúbicos y un manómetro de bourdon con una escala de 0 a 60 psi.

A continuación se presenta un esquema donde se muestra la disposición actual del equipo.

Figura 8. Esquema de tratamiento de agua actual



4.3 Funcionamiento del equipo

4.3.1 Servicio

Servicio se le conoce a la fase del funcionamiento en donde el agua esta siendo procesada, es decir filtrada y suavizada. Se desarrolla haciendo pasar el agua por el filtro y luego de salir de este, por el suavizador, que lo envía luego a las calderas.

Siguiendo la nomenclatura de la figura 8, debemos tener completamente abiertas las siguientes válvulas: 1, 5, 9 y 14 y todas las demás completamente cerradas, para que el sistema pueda estar en la función de servicio.

La presión promedio interna del sistema en esta fase de servicio es de 22 psi.

4.3.2 Retrolavado

Esta función se realiza por separado en los dos equipos, primero en el filtro y luego en el suavizador. En ambas actividades el agua corre dentro del equipo en sentido contrario al sentido que tiene en la función servicio.

Para el retrolavado del filtro se deben mantener abiertas las válvulas 3 y 2, las demás deben estar cerradas. El tiempo de retrolavado es de 15 minutos.

Para el retrolavado del suavizador se deben abrir las válvulas 3, 5, 10 y 12 y las demás deben permanecer cerradas, el tiempo de esta operación es actualmente de 10 minutos.

4.3.3 Regeneración

Esta operación se realiza solamente en el suavizador, el filtro rápido queda inoperante durante etapa.

La regeneración conlleva primero la preparación de la solución regenerante que en este caso consisten en una solución acuosa de cloruro de sodio.

Particularmente, se debe utilizar cloruro de sodio grado industrial, se agregan 100 libras al tanque para salmuera y luego se llena de agua, por medio de la válvula 6, esto viene seguido de una agitación manual con una paleta de madera grande y larga, hasta que la solución se sature, es decir hasta que ya no se observe que los sólidos del fondo se estén disolviendo.

Cuando ya se encuentra lista la solución regenerante se abre la válvula 13 y luego la número 7, debido a que toda la tubería y el suavizador esta presurizado al momento de abrirse esa válvula se rompe la presión y se genera un efecto de vacío con lo cual la solución regenerante es succionada hacia el suavizador para luego salir hacia el drenaje. Al terminarse la solución regenerante, se cierra la válvula 7 y

luego la 13, y repita el llenado, mezclado y vaciado del tanque para salmuera, terminando con esto la fase de regeneración.

Se llena de nuevo el tanque para salmuera y luego se abre la válvula 8, con el fin de limpiar el tanque de toda la basura insoluble que podía tener el cloruro de sodio.

Debido a que la dirección del flujo de la solución regenerante, es la misma que la del agua en la función servicio, se le llama regeneración en paralelo.

4.3.4 Enjuague

Se realiza haciendo pasar agua cruda por el suavizador y desechándola por el drenaje, para ello se necesita abrir las válvulas 1, 5, 10 y 12 junto a todas la demás cerradas.

El tiempo que actualmente se asigna para esta función es de 10 minutos.

Luego del enjuague, el sistema completo esta listo para volver a la función de servicio.

4.4 Mediciones

La evaluación de la calidad del agua, en cualquier momento de la función servicio o al estar poniendo en marcha el equipo luego de una regeneración y enjuague, se hace tomando una muestra por medio de la válvula 15, dejando drenar unos momentos el agua que pueda estar estancada en parte de la tubería y así recoger una muestra representativa de lo que va hacia la caldera.

El análisis de la presencia y grado de dureza del agua que va hacia caldera, se realiza con la ayuda de un juego de prueba de dureza modelo 5B marca Hach. Este juego utiliza un método de titulación volumétrica, en una muestra de volumen pequeño y definido por el recipiente muestreador, y define el valor de dureza en base a la cantidad de gotas que utiliza de uno de los reactivos, las unidades del resultado son granos por galón como carbonato de calcio, CaCO_3 .

Para ver las instrucciones completas y detalladas de este juego, puede consultarse el anexo 1.

El técnico que realiza actualmente el mantenimiento de este equipo de filtración y suavización, utiliza como punto de fuga 2 ppm de dureza.

Un aspecto importante de hacer notar es que el retrolavado, regeneración y enjuague del equipo, de la forma como se realiza actualmente, al momento de realizarse deja sin abastecimiento de agua suavizada a la caldera en funcionamiento.

5. Automatización del sistema

5.1 Selección de modos de control automático

El funcionamiento y diseño del sistema tal como se encuentra en la actualidad simplifica en mucho esta parte del trabajo, pues en todas las válvulas, la función es, del tipo abierto o cerrado, así que en su totalidad el modo de control que se utilizara será el conocido como “encendido apagado”.

5.2 Selección de ciclos de control automático

En todo el sistema se debe utilizar el ciclo de lazo con retroalimentación, ya que el equipo tendrá que actuar para realizar los ciclos de paro, retrolavados, regeneración, enjuague y puesta en marcha de nuevo, en base a algunas variables controladas que se definirán y que tendrán que estar evaluadas o monitoreadas continuamente.

5.3 Selección de componentes necesarios

Siguiendo la nomenclatura expuesta en el capítulo de sistemas de control automático de procesos, los elementos a utilizar en este proyecto, serán:

- Panel del Operador
- PLC
- Medidor de flujo volumétrico
- Sensores de nivel
- Medidor de presión
- Válvulas tipo abierto cerrado
- Otros equipos
 - Motor eléctrico
 - Tanque pulmón de agua suavizada
 - Accesorios de control eléctrico

5.4 Diseño de automatización

5.4.1 Variable principal a Controlar

La variable principal a controlar de todo el equipo de tratamiento de agua, será aquella que al llegar a un valor deseado, detenga la función de servicio e inicie todos los ciclos de retrolavado, regeneración, enjuague y puesta en marcha del equipo completo. Esta variable puede ser la dureza del agua en la salida del equipo, la cantidad de agua tratada o suavizada por el equipo y también puede ser un tiempo determinado en el que se asegure el desgaste de la resina y la necesidad de regeneración.

Si se fija como variable principal controlada la dureza del agua, se necesita un equipo que mida esta variable además que se pueda colocar directamente en la línea. Luego de algunas investigaciones se encontró un fotómetro que mide la dureza del agua, pero no se puede instalar en línea, sino hay que extraer una muestra e insertarla en el medidor para que de la lectura, además este tipo de instrumentos tiene un costo elevado, por lo que para este estudio, esta opción de la dureza del agua como variable controlada, no se tomará en cuenta.

El tomar la variable tiempo de funcionamiento, como variable controlada, funciona, cuando el flujo o uso del equipo es constante y siempre esta funcionando, sin embargo en la fabrica de dulces en donde se realizo el estudio, esto no sucede así, el funcionamiento del equipo es intermitente.

Así que la opción más adecuada para los fines de este trabajo es designar al volumen de agua suavizada como la variable controlada, el cual al llegar a un valor determinado, activara los ciclos de mantenimiento para toda la planta de tratamiento.

El manual de operación del equipo menciona, que el mismo tiene una capacidad para tratar 120 metros cúbicos de agua, este dato está basado en el estudio de dureza de agua que se hizo al fabricar el equipo.

Sin embargo, se obtuvieron los registros de el volumen de agua suavizada entre cada regeneración, en la siguiente tabla se muestra un período de 10 meses.

Tabla I Volúmenes de agua tratada entre regeneraciones

Fecha Regeneración	Volumen agua suavizada (m³)	Dureza antes de regenerar
9-Oct-2004	425	220
18-Oct-2004	204	180
22-Nov-2004	198	168
23-Dic-2005	132	140
15-Ene-2005	175	140
05-Mar-2005	268	290
02-Abr-2005	215	147
19-Abr-2005	258	126
20-May-2005	344	198
05-Jun-2005	152	126

Estos valores mostrados, presentan una falta de control en la dureza del agua de relleno de calderas y por tanto de su calidad.

Como se puede observar, dentro de estos valores, aún con volúmenes tratados de agua de 132 m³ ya el valor de la dureza es alto, pero no se tiene un periodo que nos de la medición de dureza a los 120 m³ de agua tratada, por lo que se tomara este valor como, valor deseado

de la variable a controlar, para que la planta de tratamiento inicie su ciclos de mantenimiento en ese valor.

Como recomendación de este trabajo se definirá la necesidad de realizar algunas mediciones de dureza cuando se acerque a ese valor el volumen de agua tratada y se realizaran ajustes al volumen que represente el punto de fuga para encontrar el nuevo valor deseado de la variable controlada.

Por este enfoque se necesitara colocar un sensor de flujo volumétrico, en la salida del equipo, que sea de tipo análogo y que envíe una señal al PLC, proporcional al flujo volumétrico del agua que sale del suavizador. Este sensor de flujo volumétrico deberá colocarse donde actualmente se encuentra en medidor de flujo volumétrico mecánico.

5.4.2 Dimensionamiento de tanque pulmón

Para corregir la falta de abastecimiento de agua suavizada hacia calderas, cuando la planta de tratamiento esta en sus ciclos de mantenimiento, se construirá un tanque pulmón, donde se pueda almacenar el volumen suficiente de agua suavizada, que pueda mantener

abastecimiento continuo a las calderas mientras la planta esta en mantenimiento.

Para diseñar el tamaño de este tanque, tenemos que conocer el volumen de agua que tendrá que retener, y para ello, se debe conocer el tiempo total que le lleva a la planta de tratamiento de agua, pasar por todas las etapas de su mantenimiento. Algunos de estos datos se mencionan en el capítulo 4 pues son los que se utilizan actualmente. Se seguirán utilizando para el diseño de la automatización, pues su uso ha dado buen resultado.

Los datos integrados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla II Tiempos de Mantenimiento del equipo

Etapas	Tiempo (min)
Retrolavado de filtro de arena	15
Retrolavado de suavizador	10
Regeneración de suavizador	20
Enjuague de suavizador	10

Con ello se tiene un total de 55 minutos sin abastecimiento de agua suavizada directamente de la planta de tratamiento.

Según las especificaciones de la caldera a la cual alimenta el suavizador, el consumo de agua tiene un ritmo de 2,070 libras de agua por hora.

Relacionando este valor, con el tiempo que deberá estar fuera de servicio la planta de tratamiento, se tiene, que el consumo de agua de la caldera, en ese periodo de tiempo será de:

$$\frac{2,070 \text{ lb H}_2\text{O}}{\text{hr}} * \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} * 55 \text{ min} * \frac{1 \text{ kg H}_2\text{O}}{2.205 \text{ lb H}_2\text{O}} * \frac{1 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O}}{1,000 \text{ kg H}_2\text{O}} = 0.860 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O}$$

Este será el volumen de agua suavizada que se tendrá que tener disponible para la caldera, mientras la planta de tratamiento esta en mantenimiento, si y solo si, no se tenga ningún condensado retornando a caldera, caso que se da en momentos de limpieza a la planta de producción. En esos casos de limpieza, se utiliza agua caliente, para lo cual la caldera se necesita funcionando sin que existan condensados.

Por tanto y para tener suficiente agua suavizada acumulada, en casos que se tenga muy poco o nada de condensados, ese volumen de agua servirá para dimensionar el tanque pulmón.

En función de la altura de la parte del edificio de producción donde se colocara ese tanque, que es de 2.0 metros, se propone para facilidad de montaje, limpieza y uso, una altura para el tanque pulmón de 1 metro, y utilizando la formula del volumen de un cilindro recto, se encuentra el siguiente diámetro:

$$\sqrt{[(4*V) / (\pi * h)]} = \sqrt{[(4*0.860) / (\pi * 1.0)]} = 1.05 \text{ metros}$$

Así que el tanque pulmón deberá tener 1 metro de altura y 1.05 metros de diámetro. Para fines prácticos, se dispone utilizar un deposito plástico para agua, de los que se comercializan comúnmente para almacenar agua potable en los domicilios, en un volumen de 1 m³, con dimensiones de 1.05 metros de altura y 1.10 metros de diámetro, aunque las dimensiones pueden cambiar un poco, dependiendo de la casa comercial en la cual se adquiera. El uso de este tipo de tanque daría algunas ventajas principales a construir uno:

1. Es de fácil adquisición, pues se pueden comprar en varios puntos.
2. Como esta fabricado para agua potable, su diseño evita formaciones de algas y hongos en las paredes internas.
3. Tiene sus accesorios de PVC en la entrada y salida del mismo, lo cual hace más fácil su instalación.
4. El material del cual esta construido permite colocar fácilmente otros accesorios necesarios para este proyecto.

En este tanque se deberá de colocar sensores de nivel en la parte mas alta, la mas baja y al centro de la altura total del tanque.

También se incluirá una tubería de agua cruda con una válvula abierto cerrada que llegue a su interior por la parte superior de este. Esta línea de agua, servirá como relleno de emergencia por si en algún momento la planta esta en mantenimiento y el tanque quede vacío para no dejar a las calderas, sin abastecimiento de agua.

5.4.3 Tanque de salmuera

También se necesitara incluir al diseño de la planta, un agitador dentro del tanque donde se preparara la salmuera, que sirve como

solución regeneradora. Este agitador deberá ser de acero inoxidable para evitar que se genere corrosión en el, y en base a los resultados de algunas pruebas piloto, un motor de ½ caballo de fuerza, es suficiente para cumplir esta función.

5.4.4 Descripción de la automatización del sistema

5.4.4.1 Generalidades

Con todo estos equipos nuevos, se describe el diseño completo de la automatización del sistema, diseño compuesto por 3 ciclos de control mas pequeños y con funciones especificas, pero a la vez todos interrelacionados.

Como primer paso, se presentara el diagrama del diseño propuesto para la automatización de la planta de tratamiento de agua, junto a una tabla de señales de diferentes tipos, que corresponden a los diferentes elementos de control involucrados en ese diseño.

Figura 9. Diseño de automatización del sistema

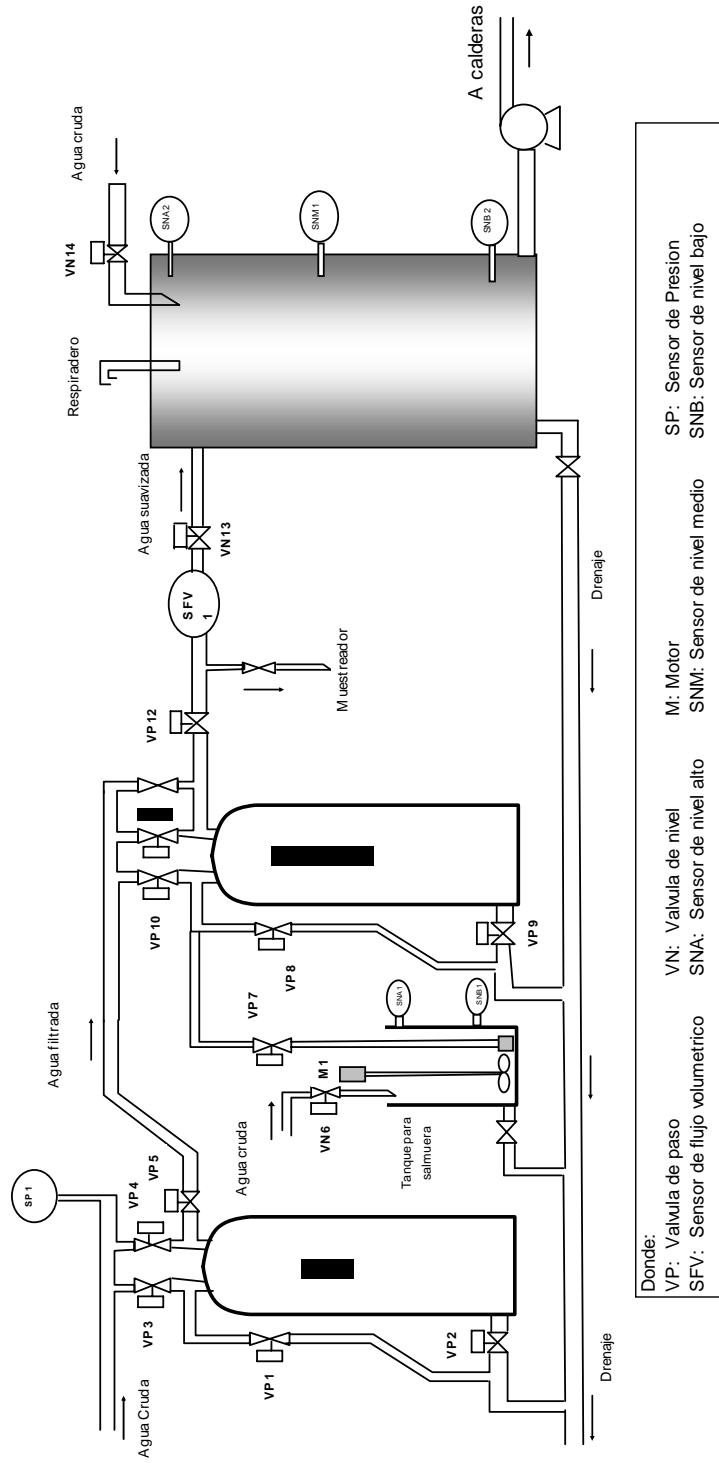


TABLA III Listado de Señales en diseño de automatización

LISTADO DE SEÑALES DE ENTRADA/SALIDA

No.	Descripción	E/D	SD	E/A	S/A	ETIQUETAS
FILTRO						
1	Válvula salida retrolavado filtro	2	1			VP1
2	Válvula de drenaje filtro	2	1			VP2
3	Válvula ingreso agua cruda a filtro	2	1			VP3
4	Válvula ingreso retrolavado filtro	2	1			VP4
5	Válvula de conducción a suavizador	2	1			VP5

TANQUE SALMUERA						
6	Nivel alto	1				SNA1
7	Nivel bajo	1				SNB1
8	Válvula alimentación de agua cruda	2	1			VN6
9	Válvula succión salmuera	2	1			VP7
10	Motor agitador	3	1			M1
11	Alarma de carga de sal		1			A4
12	Reconocimiento de alarma de sal	3				A5

SUAUZADOR						
13	Válvula salida retrolavado suavizador	2	1			VP8
14	Válvula de drenaje suavizador	2	1			VP9
15	Válvula ingreso agua filtrada a suavizador	2	1			VP10
16	Válvula de ingreso retrolavado suavizador	2	1			VP11
17	Válvula de conducción a tanque pulmón	2	1			VP12
18	Sensor de flujo volumétrico			1		SFV1
19	Sensor de presión			1		SP1

TANQUE PULMÓN						
20	Nivel alto	1				SNA2
21	Nivel bajo	1				SNB2
22	Nivel medio	1				SNM1
23	Válvula relleno agua cruda	2	1			VN14
24	Válvula ingreso agua suavizada	2	1			VN13
25	Alarma visual de nivel		1			A1
26	Alarma sonora de nivel		1			A2
27	Botonera de reconocimiento de alarma general	1				A3

TOTAL						
Entradas Digitales (Encendido-Apagado)		40				
Salidas Digitales (Encendido-Apagado)			18			
Entradas Analógicas de 4-20 mA				2		
Salidas Analógicas de 4-20 mA					0	

En la tabla anterior se muestra la cantidad y tipo de señales que intervendrán en la automatización del sistema, involucradas en cada tipo de elemento de control, la función resumida de cada señal se muestra en su descripción y por medio de la etiqueta se puede encontrar su ubicación física dentro del diseño, por medio de la figura No. 8

En la tabla, la identificación del tipo de señal se da con la siguiente nomenclatura:

E/D: Entrada tipo digital

S/D: Salida tipo digital

E/A: Entrada tipo analógica

S/A: Salida tipo analógica

En base a la cantidad total de las diferentes señales, la composición del PLC definirá los siguientes elementos:

Tabla IV Componentes del PLC

Cantidad	Descripción
1	Fuente de poder de 110 VAC/24VDC
1	CPU
1	Modulo de entradas digitales de 32 entradas
1	Modulo de entradas digitales de 16 entradas
1	Modulo de salidas digitales de 32 entradas
1	Modulo de entradas analógicas de 8 entradas
1	Panel del operador con salida para impresora

5.4.4.2 Tanque pulmón

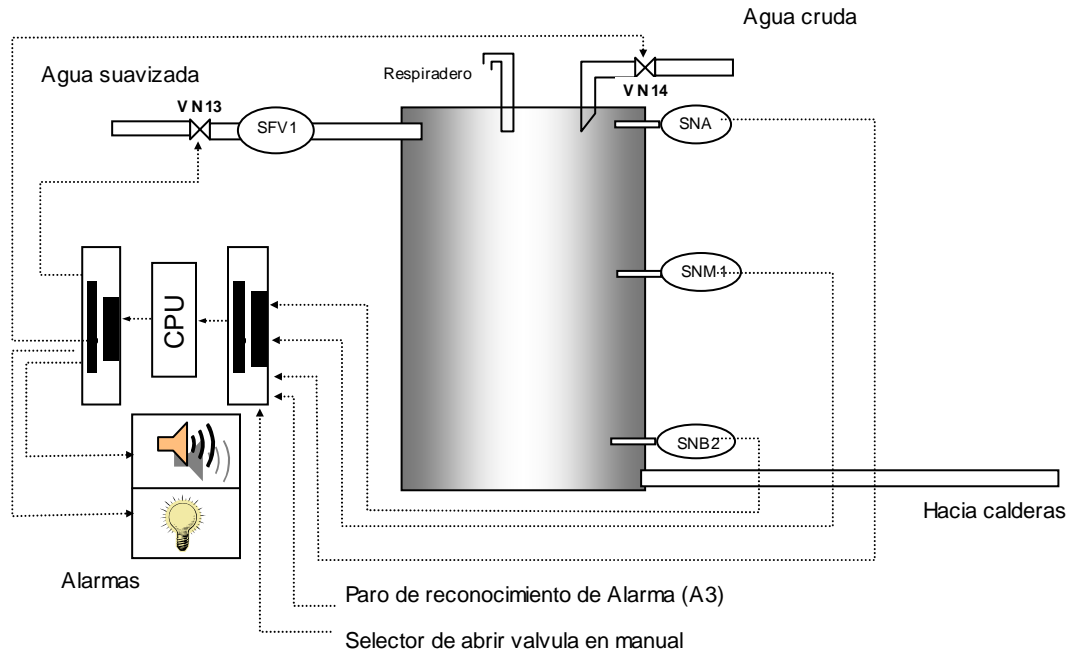
Para garantizar que siempre exista abastecimiento de agua para caldera se propone, el diseño de un tanque pulmón para almacenar agua suavizada, este tendrá una alimentación por su parte superior tanto de agua proveniente del suavizador, como una línea de agua cruda con una válvula abierto cerrada.

Tendrá incluido 3 sensores de nivel, el primero colocado al 100 % de su altura interna, el cual, al activarse enviara una señal al PLC para que este, cierre la válvula que provee de agua suavizada al tanque.

Un segundo sensor a la mitad de la altura del tanque, que al activarse enviará una señal al PLC para que este, active una señal auditiva y sonora, para que el operador revise algún mal funcionamiento del suavizador que este causando desabasteciendo de agua suavizada al tanque, esto para evitar cualquier riesgo de quedarse sin agua para las calderas.

Por ultimo un sensor en el fondo del tanque, que al activarse envíe una señal al PLC que abra la válvula de agua cruda, de la línea que llega al tanque, para que se provea de agua cruda a la caldera temporalmente mientras se revisa y solventa la situación, y proveer de nuevo agua suavizada, con la consiguiente señal sonora y lumínica para alarma.

Figura 10. Sistema automático de tanque pulmón



5.4.4.3 Tanque de salmuera

Para este ciclo se necesitara dos sensores de nivel, dos válvulas de tipo abierto cerrado y un motor eléctrico.

El fin principal de este ciclo, es mantener siempre disponible una solución regenerante para cuando el sistema necesite regenerarse.

Es importante mencionar que el operador de la planta deberá mantener siempre sal sódica en el fondo del tanque, para que al

activarse el motor agitador del tanque, pueda darse la salmuera saturada que se utilizara como solución regenerante.

Para ayudar al operador que siempre mantenga sal en el tanque, el sistema debe de disponer de una alarma que se llamara de carga de sal, que se activara al finalizar 3 ciclos de regeneración del suavizador, con el fin de recordar al operador que deberá cargar de nuevo sal en el tanque. Se define 3 ciclos, para que el operador no tenga que estar en cada ciclo de regeneración cargando sal de nuevo y asi minimizar la mano de obra necesaria en el sistema, pero no mas de 3, pues luego de unas pruebas de volumen de sal dentro del tanque, se determino que el volumen de 3 cargas es un volumen, que no resta al que contendrá el agua para formar la solución.

Dos sensores de nivel se colocaran en las partes superior e inferior del tanque, este ultimo arriba de la capa superior del lecho salino que represente tres cargas. Cuando el sensor inferior se active, enviara una señal al PLC el cual deberá accionar la válvula de agua cruda que alimenta a dicho tanque. Este ingreso de agua deberá continuar hasta que el sensor de la parte superior del tanque se active y haga que el PLC cierre completamente la válvula. En ese momento el PLC deberá

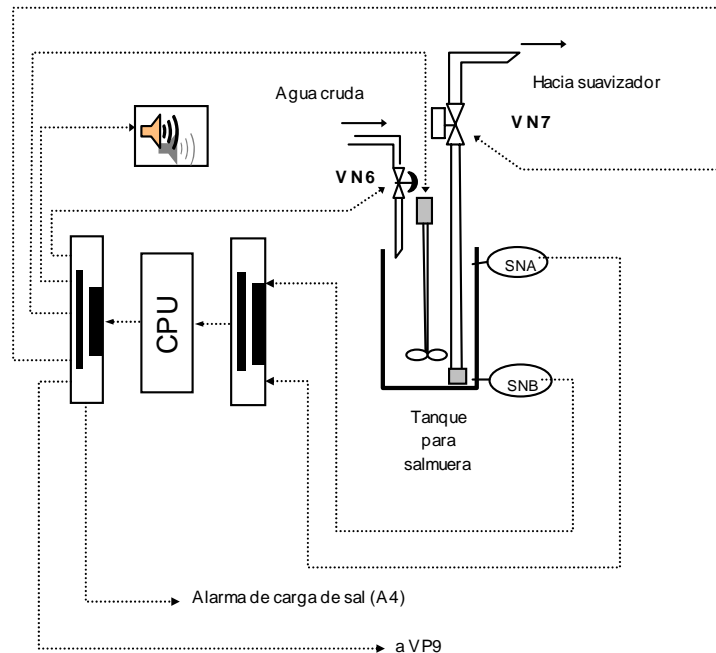
arrancar el motor del agitador por un lapso de 5 minutos, con el fin de crear una solución saturada de sal.

Esta serie de instrucciones las deberá ejecutar el PLC mientras en el suavizador se este dando el retrolavado del mismo.

Al iniciar la regeneración del suavizador, el PLC deberá abrir las válvulas de drenaje y succión de solución salina, con ello, el sistema iniciara la succión de la salmuera hacia el suavizador. Al momento de vaciarse el tanque de salmuera, el ciclo iniciara una vez mas, llenando, agitando y despachando una nueva cantidad de solución regenerante, al fin de esta segunda repetición, el PLC deberá desactivar y dejar en espera de otro ciclo de retrolavado del suavizador, al tanque y su sistema automático.

El esquema de este ciclo de control se muestra a continuación:

Figura 11. Sistema automático de tanque de salmuera



5.4.4.4 Filtro y Suavizador

El tercer sistema de control automático que comprende este diseño, está formado por el filtro, el suavizador, la tubería y accesorios con que se interconectan estos.

Para poder entender el diseño de este ciclo, es necesario analizarlo en la descripción de su funcionamiento, es decir en las etapas de: servicio, retrolavado, regeneración, enjuague y puesta en marcha de nuevo, de la planta de tratamiento.

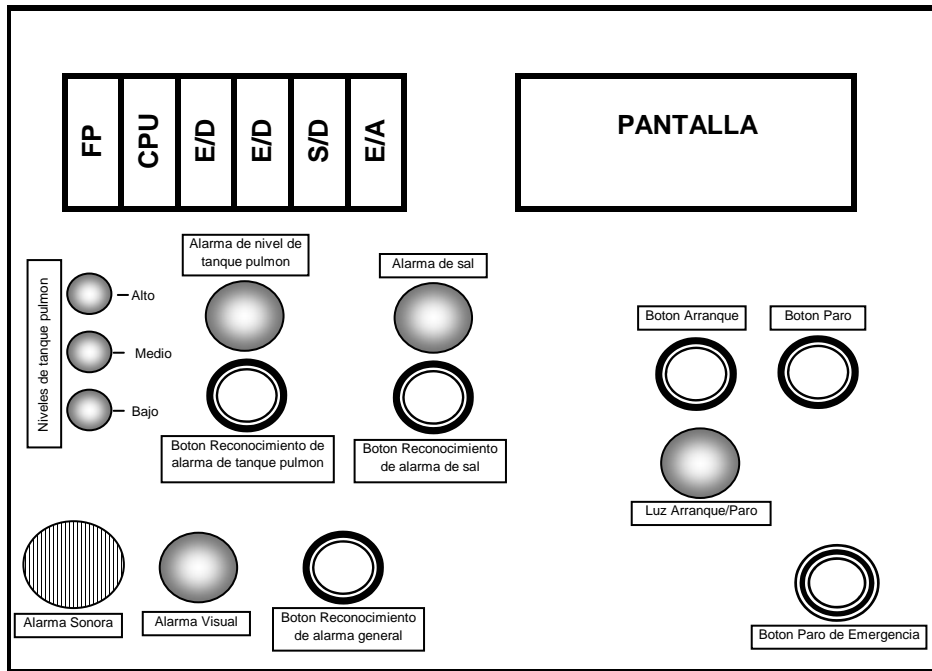
5.4.4.5 Panel del operador

Esta parte del equipo, aún cuando sencilla, comprende una parte importante del diseño y funcionamiento del equipo, pues es el equipo que comprende la comunicación entre la parte automática del equipo (PLC) y la parte humana, en este caso el operador del mismo.

Como en este diseño se utilizara no solo la pantalla donde aparezcan los valores de las variables que estará controlando el PLC, sino también algunas alarmas sonoras y visuales, y reconocimientos de estas por el operador, se presentara una panel metálico donde todos estos elementos estén integrados, conteniendo dentro de si, al PLC.

A continuación se muestra el diseño de la disposición de todos estos elementos en el panel metálico.

Figura No. 12. Diseño de panel del operador



Para armar este panel del usuario, serán necesarios los siguientes materiales

Tabla V Listado de materiales para panel de operador

Cantidad	Descripcion
88	Borneras con fusible
18	Relay de acople mas su base
1	Panel metalico de montaje
7	Luces Piloto
1	Bocina
1	Boton de paro de emergencia
5	Botones
1	UPS (Soporte electrico)
	Varios accesorios electricos (cable, etc)

5.5 Descripción del funcionamiento del equipo

Utilizando la identificación de los equipos y señales de la figura 9 y de la tabla III se describirá la secuencia de acciones que el PLC, y algunas veces el operador de la planta de tratamiento, deberán ejecutar, para el correcto desempeño de la automatización del sistema.

5.5.1 Funcionamiento del Filtro

5.5.1.1 Filtración

El agua cruda pasa por la válvula VP3 para ingresar al filtro, saliendo por la parte superior del mismo, hacia la válvula VP5, la cual la conduce al suavizador, en calidad de agua filtrada.

Este proceso se da con las válvulas VP1, VP2 y VP4 completamente cerradas.

5.5.1.2 Retrolavado

El agua pasa por la válvula VP4 hacia el interior del filtro, saliendo por la parte superior y es conducida al drenaje por la válvula VP1.

Mientras esto sucede deben de mantenerse cerradas las válvulas VP2, VP3 y VP5.

5.5.2 Funcionamiento del tanque de salmuera

5.5.2.1 Preparación de salmuera

Si los sensores SNA1 y SNB1 muestran que el tanque esta vacío de agua, este se deberá llenar de agua cruda por medio de la válvula VN6, hasta que SNA1 se active.

Luego el motor del agitador (M1) deberá arrancar por 5 minutos y luego detenerse.

5.5.2.2 Despacho de la salmuera

Cuando el suavizador se necesite la salmuera, la válvula VP7 deberá abrir y la válvula VP9 del suavizador también, con ello la solución sodica pasara succionada hacia el suavizador.

Al terminar este primer despacho de salmuera, se deberá iniciar otro ciclo de preparación y despacho.

Luego de 6 despachos, la alarma de carga de sal se deberá activar, para que el operador carga de nuevo el tanque de salmuera con sal y active el reconocimiento de dicha alarma.

5.5.3 Funcionamiento del suavizador

5.5.3.1 Operación

El agua filtrada se deberá ingresar al suavizador, por medio de la válvula VP10 y salir por medio de la válvula VP12, camino hacia el tanque pulmón. Todas las demás válvulas del suavizador se deberán mantener cerradas.

5.5.3.2 Retrolavado

Agua cruda se deberá ingresar al suavizador, por medio de la válvula VP12 y saldrá hacia el drenaje por VP8, mientras esto sucede todas las demás válvulas del suavizador se deben mantener cerradas.

5.5.3.3 Regeneración

La válvula VP9 se deberá abrir simultáneamente a la VP7 del tanque de salmuera, para que la solución regenerante ingrese al suavizador y salga hacia el drenaje.

5.5.3.4 Enjuague

Agua cruda ingresa al suavizador por medio de VP10 y sale hacia el drenaje por VP9.

5.5.4 Funcionamiento del tanque pulmón

El agua suavizada deberá ingresar al tanque, por medio de VP13 hasta que SNA2 se active y se deba cerrar dicha válvula.

Si por alguna razón el nivel dentro del tanque decrece, aún cuando VP13 este abierta y llegue a mitad de altura, entonces SNM se activara una alarma sonora y otra visual, que anunciaran al operador que revise el funcionamiento del sistema, luego de lo cual, deberá activar el reconocimiento de esas alarmas.

Si el nivel llegara a decrecer tanto, que manteniendo abierta VP13, el agua llegara al nivel del sensor SNB2, este activara una alarma sonora junto a una visual y abrirá VN14, con lo cual se proporcionara agua cruda hacia el interior del tanque, para que este no deje de proporcionar agua de relleno a la caldera. La condición de abierta para la válvula VN14 y la activación de la señal de la alarma visual, deberán terminar hasta que SNM, se active debido a que el nivel del agua, llegue a donde esta colocado el mismo.

5.5.5 Varios

El sensor de presión deberá mantener una señal analógica hacia el PLC, que se leerá, en la pantalla del panel del operador en cualquier momento, sin embargo cuando la presión del sistema exceda los 30 psi de presión, se deberá activar la alarma sonora y visual general además se deberá detener todo el sistema con un paro de emergencia. El PLC no permitirá que la planta arranque hasta que se haya activado el reconocimiento de alarma general, que se debe realizar hasta luego de haber encontrado y solucionado el problema, que ocasiono el aumento de presión. De igual forma se deberá proceder y activar las mismas señales al llegar la presión a un valor menor de 15 psi, que puede

implicar problemas en las bombas que alimentan de agua cruda a la planta de tratamiento.

El sensor de flujo volumétrico deberá de transmitir el caudal de agua suavizada que esta siendo entregada por la planta de tratamiento al tanque pulmón, y relacionar este valor, con el tiempo de trabajo del sistema, así el PLC podrá calcular el volumen de agua tratada, la cual será usada como la variable principal a controlar, para saber cuando la planta necesita activar todos los ciclos de mantenimiento de cada unidad.

Tanto el tanque de salmuera, como el tanque pulmón, tienen en el diseño dos válvulas inferiores conectadas al drenaje, con accionamiento manual. Por ello es que no se han mencionado en todo el diseño de la automatización, pero son importantes, para cuando se requiera la limpieza de cualquiera de estos tanques, teniendo el cuidado siempre, de al terminar una limpieza, dejar completamente cerradas estas válvulas.

6. ANALISIS DE COSTO DEL DISEÑO

6.1. Costo de la Automatización del equipo

Primero se debe conocer el costo de inversión inicial de la automatización propuesta para el equipo analizado, para ello se evaluó el precio de lista en el mercado, de los equipos y accesorios que se necesitan, estos precios se muestran a continuación:

Tabla VI Costos de la automatización del equipo

CANTIDAD	DESCRIPCION	COSTO (Q)
1	PLC para montaje normalizado riel DIN 30 mm	6,460.00
1	Fuente de poder para PLC	1,140.00
1	Panel metalico con llave	1,900.00
14	Valvula de PVC de bola de 1 ¼" con actuador neumatico	34,580.00
14	Electrovalvulas	4,256.00
14	Identificadores de posicion	4,256.00
1	Pantalla del PLC	1,330.00
1	Servicio de Montaje Mecanico del sistema	3,800.00
1	Servicio de planos y diagramas electricos de control	1,140.00
1	Servicio de configuracion de PLC y puesta en marcha	6,080.00
	Accesorios electricos, incluye: cable, borneras, fusibles, marcadores de cable, riel DIN, canaletas, luces piloto, botoneras, selectores, relay, etc	1,900.00

Lo que da un total de Q 64, 942.00 como costo inicial de la automatización.

6.2. Pérdida económica por incrustación

La formación de incrustaciones en las calderas, formadas por la dureza del agua de alimentación que llegan a las mismas, ocasionan graves problemas. Por la característica aislante y por localizarse precisamente en las superficies de transferencia de calor, donde primero se depositan, causan un gran daño económico, que cada día es mayor por el aumento del costo del combustible.

Para poder calcular el costo extra de combustible que se genera, cuando la caldera tiene incrustaciones en el lado del agua, se necesitan algunos datos, como: tiempo de trabajo de la caldera, consumo energético de la caldera en particular, el ritmo de consumo de combustible, el costo del combustible que utiliza (en este caso diesel) y la eficiencia de trabajo de la caldera.

Para la caldera que es alimentada por el equipo de suavización en estudio, se tiene:

Tabla VII Datos generales para análisis de gasto de combustible

Tiempo de trabajo	5,000 horas / año
Consumo energético	2,510,000 Btu por hora
Ritmo de consumo de combustible	18 galones por hora
Costo del diesel	Q 16.75 por galón
Eficiencia de caldera	75 %

Fuente: placa de la caldera, proveedor de combustible y proveedor de servicio de mantenimiento de la caldera.

Además se debe de conocer el grosor aproximado de la incrustación de los tubos en el lado del agua, que la caldera posee. Con este valor conocido y ayudado por estudios realizados entre el grosor de la incrustación y el porcentaje de gasto extra de combustible, como el presentado en el anexo 2 se puede conocer el valor monetario del exceso de consumo de combustible, debido a la incrustación presente.

El valor aproximado del grosor de la incrustación encontrada en el último mantenimiento dado a la caldera de la fábrica en estudio fue de 1 milímetro.

6.2.1 Consumo energético por año

$$5,000 \text{ horas/año} * 2,1510,000 \text{ Btu/hr} * 75 \% = 9.4125 \times 10^9 \text{ Btu/año}$$

6.2.2 Gasto actual de combustible por año

$$5,000 \text{ horas/año} * 18 \text{ gal/hr} * 75 \% = 67,500 \text{ gal/año}$$

6.2.3 Gasto extra de combustible por año

1 milímetro de incrustación representa 0.0393 pulgadas. Al ubicar este valor en la tabla VIII del anexo 2, se encuentra que el porcentaje extra de combustible en estas condiciones es de 9.3 %, por ello la cantidad de combustible extra consumido por año con esta incrustación es de:

$$67,600 \text{ gal/año} * 9.3\% = 6,286.80 \text{ gal / año}$$

Al tener una mejor calidad de agua de relleno para la caldera, se tiene una menor incrustación sobre los tubos de la caldera en el lado del agua, para fines prácticos se tomara como la nueva incrustación el valor mas pequeño de incrustación del estudio mostrado en la tabla VIII del

anexo 2, el cual es de 1/64 de pulgada lo que equivale a aproximadamente 0.4 milímetros. Así el porcentaje extra de combustible que corresponde a esta incrustación es de 6.5 %, que representa un volumen de:

$$67,600 \text{ gal/año} * 6.5 \% = 4,394.00 \text{ gal / año}$$

Entonces la diferencia entre los volúmenes de combustible extra gastados a dos diferentes incrustaciones, da por resultado el ahorro que se daría en combustible al implementar el diseño de la planta de tratamiento de agua, propuesto.

$$6,286.80 \text{ gal / año} - 4,394.00 \text{ gal / año} = 1,892.80 \text{ gal / año}$$

6.2.4 Ahorro de combustible por año

Entonces se tiene un ahorro anual de combustible de:

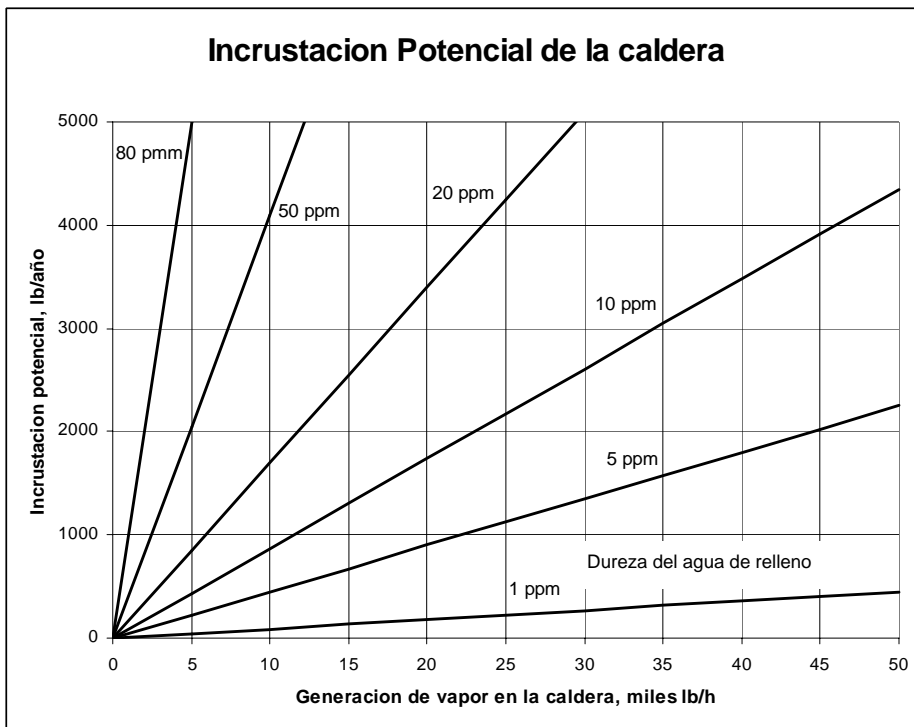
$$1,892.80 \text{ gal / año} * Q 16.75 / \text{gal} = Q 31,704.40$$

Este valor puede incrementarse, en la medida que la incrustación pueda llegar a ser menor a 0.4 milímetros.

6.3 Incrustación potencial de la caldera

Para proporcionar una idea de la magnitud de la incrustación que puede alcanzar una caldera por la dureza del agua de relleno que llega a ella, se han realizado estudios que se presentan en la grafica siguiente:

Figura 13 Incrustación potencial de la caldera



Fuente: ICAITI, Mejoramiento de la eficiencia de operación de calderas de vapor, pag 144

La caldera que es alimentada por la planta de tratamiento de agua en estudio, tiene una capacidad de 60 HP, lo que representa una generación de vapor de 2,070 libras de vapor por hora.

Usando el valor de 2,000 libras de vapor por hora y buscando el valor de 80 ppm en la figura 13, se encuentra que hay un potencial de 2,000 libras de incrustación por año en los tubos, debido a la dureza del agua de relleno que se está usando en esa caldera. Ese valor de 80 ppm, es el promedio encontrado en los análisis realizados por el proveedor de mantenimiento de calderas.

Mientras que si se tiene un funcionamiento efectivo de la planta de tratamiento de agua en el suavizado de la misma, y con ello durezas de 1 ppm, la incrustación potencial disminuye a 18 libras por año, es decir una disminución de 1982 libras por año de incrustación menos, lo cual asegura una mayor vida del equipo y un incremento en su eficiencia, con el correspondiente ahorro de combustible.

6.4 Ahorro en consumo de productos químicos

Actualmente se consumen Q 24,120.00 al año en productos químicos para tratar el agua antes de entrar a la caldera y minimizar así

el efecto negativo que pueda generar la dureza actual del agua de relleno que llega a dicha caldera.

Realizando un análisis junto al proveedor del servicio de mantenimiento de la caldera, al momento de que el agua de alimentación siempre presente un mínimo valor de dureza, la reducción del consumo de químicos puede llegar a ser de 55 % del actual.

Así se tiene una reducción de gasto por consumo de productos químicos para tratamiento interno de la caldera de:

$$Q 24,120.00 * 55\% = Q 13,266.00$$

6.5 Limpieza química de caldera

Al momento de ejecutarse este proyecto, es recomendable, que se realice un tratamiento químico para eliminar la incrustación actual, y poder así evaluar en el futuro el grado de incrustación ya con una calidad constante de agua de relleno. Con Información obtenida del proveedor de productos químicos, se tiene que el costo aproximado de esta desincrustación por medios químicos es de Q 4,221.00 valor que será tomado como parte del valor de inversión inicial del proyecto.

6.6 Resultados del análisis del costo de diseño

Agrupando los ahorros anuales de consumo de combustible y del uso de productos químicos, se tiene un potencial ahorro anual de:

$$Q 13,266.00 + Q 31,704.40 = Q 44,970.40$$

Que al compararlo con el valor de inversión inicial de este estudio, que incluye propiamente la automatización y la limpieza química desincrustante:

$$Q 64,942.00 + Q 4,221.00 = Q 69,163.00$$

se encuentra que el proyecto es viable financieramente, y que el tiempo recuperación del capital de inversión inicial será de:

$$Q 69,163.00 / Q 44,970.40 = 1.54 \text{ años o } 18.5 \text{ meses}$$

Luego de ese periodo de tiempo se tendría un ahorro anual aproximado de:

Q 44,970.40

Por lo que si es factible realizar este proyecto con beneficios económicos y de calidad para la compañía donde se realizo el estudio.

Hay que hacer notar, que otro beneficio adicional que provee la aplicación del diseño propuesto en este trabajo, es utilización al máximo de la vida media del equipo generador de vapor, pues se minimiza la rotura de tubos y partes metálicas. Para que el lector tenga una idea del costo de un equipo semejante al que existe en la fábrica donde se realizo el estudio, se investigo su precio de lista en el mercado guatemalteco, encontrándose un valor de Q 380,000.00

CONCLUSIONES

1. La planta de tratamiento de agua, actualmente, trabaja sin asegurar una calidad de agua adecuada para la generación de vapor en la fábrica de dulces en estudio.
2. Con un sistema automático con lazo de retroalimentación de control, tipo apagado/encendido y sus elementos de control, se puede automatizar el equipo de tratamiento de agua actual, garantizando agua con la calidad adecuada para la generación de vapor requerido para la fabricación de dulces.
3. Con el diseño propuesto se disminuye el riesgo de daño al equipo generador de vapor, incrementando su eficiencia y vida útil, y generando un ahorro en el gasto de combustible y en los reactivos químicos que, actualmente, se utilizan en el tratamiento interno del agua de relleno.

4. El valor de inversión inicial del diseño, tiene una recuperación económica de 18.5 meses, luego de lo cual se tendría un ahorro anual por conceptos de combustible y productos químicos de Q 44,970.40

5. Con el conocimiento de los conceptos y aplicaciones de los modos de control automáticos en equipos y procesos, se puede mejorar la eficiencia y facilitar la operación de los sistemas de trabajo actual, en la industria.

RECOMENDACIONES

1. Profundizar en el tema de la automatización industrial, en la carrera de ingeniería química, para que sirva como una herramienta al profesional, en el desarrollo de sus labores dentro de la industria nacional o internacional.
2. Incluir la opción de automatización cuando se necesite facilitar la operación y mejorar la eficiencia, de equipos y sistemas; problemas con los que el profesional de ingeniería química se enfrenta en su desempeño diario.
3. Revisar el funcionamiento del diseño propuesto en la búsqueda de mejoras al mismo.
4. Realizar estudios de mejora y modernización en cualquier planta industrial, con el fin de que exista una mejora en su funcionamiento y una recuperación de capital para la empresa a la cual pertenezca.

BIBLIOGRAFÍA

1. Diversey Wyandotte Química S. A., **Tratamiento de aguas para calderas y sistemas de enfriamiento**, Guatemala, Diversey Wyandotte Química S. A, 1987, paginas 26, 27 y 57.
2. ICAITI-Proyecto de eficiencia energética en la industria regional, **Mejoramiento de la eficiencia de operación de calderas de vapor**, Edición preliminar, Georgia Atlanta U.S.A., 1981, paginas 34, 139, 143, 144 y A-4.
3. ISA, **Basic Automatic Process Control**, Automatic process control series, paginas 1-15
4. ISA, **Process control modes - Instrumentation basics**, paginas 4-20
5. George Fisher Signet Inc., **Measurement & Instrumentation Product catalog**, 2004, pagina 28

6. **PAMMIX, Equipos para tratamiento de aguas**, Guatemala, 1995,
paginas 2 y 4

7. **SISTEAGUA, Calidad del agua para generadores de vapor**, México,
2004, paginas 2 al 10.

ANEXOS

ANEXO 1

Informacion de Uso de Juego de prueba para dureza Hach 5 B

**Juego de Prueba
Modelo 5B para Dureza**
No. de Cat. 1453-00

NOTA
Este juego contiene compuestos potencialmente perjudiciales si son empleados incorrectamente. Lea usted con cuidado las etiquetas de todos los recipientes.

DIRECCIONES

1. Llenar tubo de ensayo (No. de Cat. 438-00) hasta el **borde** con muestra.
2. Verter muestra en una botella de mezclar (No. de Cat. 439-06).
3. Agregar una cucharada rasa (No. de Cat. 511-00) de Reactivo para Dureza UniVer[®] 3 (No. de Cat. 213-20).
4. Agregar la Solución Tituladora Hardness 3 (No. de Cat. 426-32) a la botella de mezclar, gota a gota, a tiempo que revuelve circularmente. Cuando el color de la muestra cambia de rosado a azul, anote el número de gotas que se han agregado.

Nota: Si aparece el color azul con una sola gota de titulador, entonces la dureza total es < 1 grano (grain) por galón.

5. Número de gotas = Dureza Total de la Muestra en granos (grains) por galón como CaCO₃.

Hecho en E.U.A.

ANEXO 2

Tabla VIII Pérdidas de energía debido a depósitos de incrustación en calderas

Espesor de incrustación en plg	Gasto extra de combustible %
1/64	6.5
1/32	8.5
1/25	9.3
1/20	11.1
1/16	12.4
1/4	25.0
3/8	40.0
1/2	55.0

Fuente: Diversey Wyandotte Quimica S. A., **Tratamiento de aguas para calderas y sistemas de enfriamiento**, pagina 27

ANEXO 3

Tabla IX Información de caldera

Marca	Cleaver Brooks
Tipo	CB Packaged Boiler
Modelo	CB 100-60
Máxima presión	150 psi
Entrada	2 510 000 Btu/hr
Consumo combustible	18 gph

Fuente: Manual de operación y mantenimiento de la caldera.