



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

## **TENDENCIAS TECNOLÓGICAS EN EL CONTROL E INSTRUMENTACIÓN DE CALDERAS**

**Arcenio David Figueroa Arias**

Asesorado por el Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma

Guatemala, febrero de 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**TENDENCIAS TECNOLÓGICAS EN EL CONTROL E  
INSTRUMENTACIÓN DE CALDERAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ARCENIO DAVID FIGUEROA ARIAS**  
ASESORADO POR EL ING. CARLOS ANÍBAL CHICOJAY COLOMA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, FEBRERO DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

|                   |                                      |
|-------------------|--------------------------------------|
| <b>DECANO</b>     | Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos     |
| <b>VOCAL I</b>    | Inga. Glenda Patricia García Soria   |
| <b>VOCAL II</b>   | Inga. Alba Maritza Guerrero de López |
| <b>VOCAL III</b>  | Ing. Miguel Angel Dávila Calderón    |
| <b>VOCAL IV</b>   | Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz       |
| <b>VOCAL V</b>    |                                      |
| <b>SECRETARIA</b> | Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas     |

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

|                   |                                       |
|-------------------|---------------------------------------|
| <b>DECANO</b>     | Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos      |
| <b>EXAMINADOR</b> | Ing. Víctor Manuel Ruiz Hernández     |
| <b>EXAMINADOR</b> | Ing. Luis Alfredo Asturias Zúñiga     |
| <b>EXAMINADOR</b> | Ing. Francisco Arrivillaga Ramazzinni |
| <b>SECRETARIA</b> | Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas      |

## 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:

### TENDENCIAS TECNOLÓGICAS EN EL CONTROL E INSTRUMENTACIÓN DE CALDERAS,

tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 7 de Mayo de 2007.



Arcenio David Figueroa Arias



Guatemala 19 de septiembre de 2007.

Ing. Fredy Mauricio Monrroy Peralta  
Director  
Escuela Ingeniería Mecánica  
Presente.

Ingeniero Monrroy:

De manera atenta me dirijo a usted, para hacer de su conocimiento que se ha concluido con la asesoría del informe final del **Trabajo de Graduación** denominado: **TENDENCIAS TECNOLÓGICAS EN EL CONTROL E INSTRUMENTACIÓN DE CALDERAS**, elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Mecánica, Arcenio David Figueroa Arias.

El presente trabajo de investigación, cumple con los objetivos que dieron origen al mismo, por lo tanto me permito recomendar su aprobación.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



**Carlos Anibal Chicoy Coloma**

**Ingeniero Mecánico**


Colegiado 2,309

Asesor del trabajo de graduación



El Coordinador del Área Térmica de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado TENDENCIAS TECNOLÓGICAS EN EL CONTROL E INSTRUMENTACIÓN DE CALDERAS, del estudiante **Arcenio David Figueroa Arias**, recomienda su aprobación.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Julio César Molina Zaldaña  
Coordinador de Área

Guatemala, octubre de 2007.

/behdei



El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área Térmica al Trabajo de Graduación titulado TENDENCIAS TECNOLÓGICAS EN EL CONTROL E INSTRUMENTACIÓN DE CALDERAS, del estudiante Arcenio David Figueroa Arias, procede a la autorización del mismo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Fredy Matricio Monroy Peralta  
DIRECTOR



Guatemala, febrero de 2008

/behdei

Universidad de San Carlos  
de Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG. 053.2008

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **TENDENCIAS TECNOLÓGICAS EN EL CONTROL E INSTRUMENTACIÓN DE CALDERAS**, presentado por el estudiante universitario **Arcenio David Figueroa Arias**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos \*  
DECANO



Guatemala, febrero de 2008

/gdech



## **AGRADECIMIENTOS A:**

|  |  |
|--|--|
| <b>Dios</b>  | Por su amor y fortaleza, por dirigir mis pasos.            |
| <b>Mis padres</b>  | Por su apoyo y esfuerzo.                                   |
| <b>Mi esposa</b>   | Por su amor y compañía durante toda la carrera.            |
| <b>Mis catedráticos</b>  | Por sus enseñanzas dentro y fuera de los salones.          |
| <b>La Facultad de Ingeniería</b>   | Por abrirme sus puertas.                                   |
| <b>La Universidad de San Carlos de Guatemala</b>   | Por su invaluable tarea.                                   |
| <b>El Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma</b>   | Por apoyarme, con su experiencia, asesorando este trabajo. |
| <b>A las entidades privadas:<br/>Reset S.A., Calzado Magus y<br/>Embotelladora La Mariposa</b> | Por la oportunidad laboral que me dieron.                  |

## **ACTO QUE DEDICO A:**

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| <b>Dios</b>                         | Porque sin merecerlo me ama y bendice.                               |
| <b>Mis padres</b>                   | Berta y Arcenio porque este triunfo también es de ellos.             |
| <b>Mi esposa</b>                    | Porque ella me ha dedicado parte de su vida.                         |
| <b>Mi hijo Josué</b>                | Porque lo amo y porque ha llenado de alegría mi corazón.             |
| <b>Mis hermanos</b>                 | Mirna, Joaquin y Walter, porque quiero ser un ejemplo a seguir.      |
| <b>Seño Lorena y Profesor Koki</b>  | Por sus enseñanzas y consejos y por su fe en que esto era posible.   |
| <b>RESET S.A.</b>                   | Por su apoyo económico durante gran parte de mi carrera estudiantil. |
| <b>Mis amigos<br/>Selvin y Joel</b> | Por su apoyo cuando las cosas no marchaban bien.                     |
| <b>Guatemala</b>                    | Porque merece que luchemos por ella.                                 |

# ÍNDICE GENERAL

|  |      |
|--|------|
| <b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>             | VII  |
| <b>GLOSARIO</b>                            | XI   |
| <b>RESUMEN</b>                             | XV   |
| <b>OBJETIVOS</b>                           | XVII |
| <b>INTRODUCCIÓN</b>                        | XIX  |
| <br>                                       |      |
| <b>1. CONTROL DE PROCESOS</b>              |      |
| 1.1 Definiciones en control                | 2    |
| 1.1.1 Campo de medida ( <i>range</i> )     | 2    |
| 1.1.2 Alcance ( <i>Span</i> )              | 3    |
| 1.1.3 Error                                | 3    |
| 1.1.4 Exactitud                            | 5    |
| 1.1.5 Precisión                            | 5    |
| 1.1.6 Banda muerta                         | 7    |
| 1.1.7 Sensibilidad                         | 8    |
| 1.1.8 Histéresis                           | 8    |
| 1.2 Clases de Instrumentos                 | 9    |
| 1.2.1 En función del instrumento           | 9    |
| 1.2.2 En función de la variable de proceso | 14   |
| 1.2.3 Identificación y simbología básica   | 14   |
| 1.3 Válvulas de Control                    | 29   |
| 1.3.1 Tipos de válvulas                    | 29   |
| 1.3.1.1 Válvula de globo                   | 30   |
| 1.3.1.2 Válvula en ángulo                  | 31   |
| 1.3.1.3 Válvula de mariposa                | 32   |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 1.3.1.4 | Válvula de bola                               | 33 |
| 1.3.2   | Cuerpo de la válvula                          | 34 |
| 1.3.3   | Tapa de la válvula                            | 36 |
| 1.3.4   | Obturador y asientos (internos de la válvula) | 36 |
| 1.3.5   | Características de caudal inherente           | 38 |
| 1.3.6   | Tipos de acciones de las válvulas de control  | 40 |
| 1.3.7   | Dimensionamiento de las válvulas              | 41 |
| 1.3.8   | Cavitación en válvulas                        | 43 |
| 1.4     | Tipos de Control                              | 45 |
| 1.4.1   | Control manual                                | 47 |
| 1.4.2   | Control todo nada ( <i>on –off</i> )          | 48 |
| 1.4.3   | Control flotante                              | 49 |
| 1.4.4   | Control proporcional de tiempo variable       | 49 |
| 1.4.5   | Control PID                                   | 50 |
| 1.4.5.1 | Acción proporcional                           | 50 |
| 1.4.5.2 | Acción integral                               | 51 |
| 1.4.5.3 | Acción derivativa                             | 52 |

## **2 FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS DEL VAPOR**

|       |                     |    |
|-------|---------------------|----|
| 2.1   | Qué es el vapor     | 53 |
| 2.1.1 | BTU                 | 53 |
| 2.1.2 | Temperatura         | 53 |
| 2.1.3 | Calor               | 54 |
| 2.1.4 | Saturación          | 54 |
| 2.1.5 | Entalpía            | 54 |
| 2.1.6 | Presión manométrica | 54 |
| 2.1.7 | Presión Absoluta    | 54 |
| 2.1.8 | Calor Sensible      | 54 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2.1.9 | Calor latente                           | 55 |
| 2.2   | Formación de vapor                      | 55 |
| 2.3   | Punto de ebullición                     | 58 |
| 2.4   | Vapor húmedo                            | 59 |
| 2.5   | Vapor recalentado                       | 60 |
| 2.6   | Componentes básicos de una red de vapor | 61 |
| 2.7   | Tablas de vapor                         | 65 |

### **3 CALDERAS DE VAPOR**

|        |                                  |    |
|--------|----------------------------------|----|
| 3.1    | Definición                       | 69 |
| 3.2    | Partes y terminología            | 71 |
| 3.2.1  | Capacidad de una caldera         | 71 |
| 3.2.2  | Sistema de control de combustión | 72 |
| 3.2.3  | Condensado                       | 72 |
| 3.2.4  | Tanque de condensado             | 72 |
| 3.2.5  | Desareador                       | 72 |
| 3.2.6  | Demanda                          | 72 |
| 3.2.7  | Desmineralizador                 | 72 |
| 3.2.8  | Tiro                             | 73 |
| 3.2.9  | Domo                             | 73 |
| 3.2.10 | Nivel del domo                   | 73 |
| 3.2.11 | Control de nivel del domo        | 73 |
| 3.2.12 | Combustible dual                 | 73 |
| 3.2.13 | Economizador                     | 74 |
| 3.2.14 | Eficiencia                       | 74 |
| 3.2.15 | Exceso de aire                   | 74 |
| 3.2.16 | Agua de alimentación             | 74 |
| 3.2.17 | Sistema de control del quemador  | 74 |
| 3.2.18 | Tiro forzado                     | 75 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 3.2.19  | Tiro Inducido                              | 75 |
| 3.2.20  | Combustible                                | 75 |
| 3.2.21  | Relación aire combustible                  | 75 |
| 3.2.22  | Control de relación aire combustible       | 76 |
| 3.2.23  | Hogar                                      | 76 |
| 3.2.24  | Suavizador                                 | 76 |
| 3.2.25  | Chimenea                                   | 76 |
| 3.2.26  | Purga                                      | 76 |
| 3.3     | Tipos de calderas                          | 77 |
| 3.3.1   | Calderas pirotubulares                     | 77 |
| 3.3.1.1 | Aplicaciones de calderas pirotubulares     | 79 |
| 3.3.2   | Calderas acuotubulares                     | 80 |
| 3.3.2.1 | Aplicaciones de las calderas acuotubulares | 81 |

#### **4 CONTROLES BASICOS DE CALDERAS**

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 4.1     | Control de nivel del domo                                   | 85  |
| 4.1.1   | Control de nivel manual                                     | 85  |
| 4.1.2   | Control todo / nada   | 87  |
| 4.1.3   | Control de nivel modulante                                  | 88  |
| 4.1.3.1 | Un elemento   | 89  |
| 4.1.3.2 | Dos elementos   | 90  |
| 4.1.3.3 | Tres elementos  | 91  |
| 4.1.4   | Ventajas del control modulante sobre el control todo / nada | 94  |
| 4.1.5   | Tipos de alarmas  | 94  |
| 4.2     | Control de combustión                                       | 97  |
| 4.2.1   | Posición simple punto                                       | 99  |
| 4.2.2   | Posición paralela con equilibrio de Oxígeno                 | 100 |
| 4.2.3   | Control de combustión con medición completa                 | 101 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.2.4 | Ventajas de actualizar el control de combustión           | 102 |
| 4.3   | Control de TDS  | 103 |
| 4.4   | Agua de alimentación de caldera                           | 103 |
| 4.4.1 | Instrumentación y tratamiento interno del agua de caldera | 106 |
| 4.4.2 | Instrumentación y tratamiento externo del agua de caldera | 107 |
| 4.4.3 | Instrumentación y manejo de condensado                    | 113 |
| 4.5   | Reguladores de presión auto-operados                      | 114 |

## **5 TRANSMISORES DE PRESIÓN ELECTRÓNICOS**

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 5.1   | Definición   | 118 |
| 5.2   | Tipos de presión                                     | 119 |
| 5.2.1 | Presión Absoluta                                     | 120 |
| 5.2.2 | Presión atmosférica                                  | 120 |
| 5.2.3 | Presión relativa o manométrica                       | 120 |
| 5.2.4 | Presión diferencial                                  | 120 |
| 5.2.5 | Vacío  | 121 |
| 5.3   | Principio de medición de los transmisores de presión | 121 |
| 5.4   | Tipos de transmisores de presión electrónicos        | 121 |
| 5.4.1 | Piezoeléctrico                                       | 122 |
| 5.4.2 | Resistivo  | 122 |
| 5.4.3 | Capacitivo   | 122 |
| 5.4.4 | Magnético  | 123 |
| 5.4.5 | Extensométrico                                       | 123 |
| 5.5   | Comunicación y señales                               | 123 |
| 5.5.1 | Señal analógica                                      | 127 |
| 5.5.2 | <i>Fieldbus Foundation</i>                           | 128 |
| 5.5.3 | <i>Profibus</i>                                      | 129 |
| 5.5.4 | <i>Hart</i>  | 133 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 5.6   | Aplicaciones de los transmisores de presión<br>en la medición de nivel | 135 |
| 5.6.1 | Tanque abierto   | 136 |
| 5.6.2 | Tanque cerrado   | 138 |
| 5.6.3 | Aplicaciones en calderas   | 143 |
| 5.7   | Calibración y ajuste   | 143 |
|       | <b>CONCLUSIONES</b>  | 151 |
|       | <b>RECOMENDACIONES</b>   | 153 |
|       | <b>BIBLIOGRAFÍA</b>  | 155 |



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1  | Instrumento con rango -30 a 50°C                                | 3  |
| 2  | Transmisor de presión ciego                                     | 9  |
| 3  | Indicador digital   | 10 |
| 4  | Registrador electrónico   | 11 |
| 5  | Elemento primario   | 11 |
| 6  | Transmisor multivariable de presión y temperatura               | 12 |
| 7  | Elementos finales de control                                    | 13 |
| 8  | Letras y números utilizados para identificación de instrumentos | 15 |
| 9  | Símbolos generales  | 18 |
| 10 | Líneas de conexión de instrumentos                              | 19 |
| 11 | Símbolos de instrumentos en un proceso simple                   | 20 |
| 12 | Elementos primarios para el control de temperatura              | 23 |
| 13 | Elementos primarios para el control de presión                  | 24 |
| 14 | Elementos primarios para el control de nivel                    | 25 |
| 15 | Elementos primarios para el control de flujo                    | 26 |
| 16 | Elementos finales de control                                    | 28 |
| 17 | Válvula de globo  | 30 |
| 18 | Válvula en ángulo   | 31 |
| 19 | Válvula de mariposa   | 32 |
| 20 | Válvula de bola   | 33 |
| 21 | Características de caudal inherente de las válvulas de control  | 39 |
| 22 | Caída de presión a través de la válvula                         | 44 |
| 23 | Control manual  | 47 |

|    |   |     |
|----|---|-----|
| 24 | Control todo nada   | 48  |
| 25 | Acción proporcional   | 51  |
| 26 | Energía de vaporización del agua  | 56  |
| 27 | Componentes de una red de vapor   | 61  |
| 28 | Diagrama esquemático de una red de vapor  | 62  |
| 29 | Manejo del condensado en la red de vapor  | 65  |
| 30 | Caldera pirotubular   | 78  |
| 31 | Caldera acuotubular   | 80  |
| 32 | Simulación de los controles de una caldera  | 84  |
| 33 | Control manual del nivel de agua en la caldera  | 86  |
| 34 | Control de nivel todo-nada  | 87  |
| 35 | Control de nivel modulante de un elemento   | 89  |
| 36 | Control de nivel modulante de dos elementos   | 91  |
| 37 | Control de nivel modulante de tres elementos  | 93  |
| 38 | Hogar de una caldera pirotubular deformado por efecto de una falla en el control de nivel | 96  |
| 39 | Variaciones de la presión por el consumo de vapor   | 98  |
| 40 | Control de combustión simple punto  | 99  |
| 41 | Control de combustión con compensación de oxígeno   | 100 |
| 42 | Control de combustión con medición completa   | 101 |
| 43 | Control manual de purgas de fondo   | 105 |
| 44 | Control automático de purgas de superficie  | 106 |
| 45 | Válvula para el control de purgas de fondo  | 107 |
| 46 | Sensores y monitor de turbidez  | 109 |
| 47 | Sensor de oxígeno disuelto  | 110 |
| 48 | Indicador y sensores de ph  | 111 |
| 49 | Monitoreo de la dureza del agua en un sistema de ablandamiento                            | 112 |
| 50 | Instrumentación en un tanque de condensado  | 113 |
| 51 | Regulador de presión  | 114 |

|    |   |     |
|----|---|-----|
| 52 | Control de presión con un regulador e instrumentación convencional  | 116 |
| 53 | Clases de presión   | 119 |
| 54 | Variables críticas y no críticas de proceso   | 126 |
| 55 | Conexión de instrumentos con tecnología <i>fieldbus</i>   | 129 |
| 56 | Comparación entre comunicación <i>Profibus</i> y 4-20 mA  | 131 |
| 57 | Comunicación <i>Hart</i>  | 134 |
| 58 | Transmisores de presión diferencial   | 136 |
| 59 | Medición de nivel con un transmisor de presión diferencial en un tanque abierto                                       | 137 |
| 60 | Conexión de un transmisor de presión diferencial para medición de nivel en un tanque cerrado con <i>pierna seca</i>   | 139 |
| 61 | Conexión de un transmisor de presión diferencial para medición de nivel en un tanque cerrado con <i>pierna húmeda</i> | 140 |
| 62 | Instrumento ideal   | 144 |
| 63 | Instrumento descalibrado  | 145 |
| 64 | Error de cero   | 146 |
| 65 | Error de multiplicación   | 147 |
| 66 | Error de angularidad  | 147 |
| 67 | Conexiones eléctricas para la calibración   | 149 |
| 68 | Simulación y lectura de presión   | 149 |
| 69 | Botones de ajuste   | 149 |

## TABLAS

|     |   |    |
|-----|---|----|
| I   | Letras de identificación de instrumentos  | 16 |
| II  | Tablas de vapor saturado  | 66 |
| III | Aplicaciones de las calderas pirotubular y acuotubular                                    | 82 |
| IV  | Selección de la estrategia de control de nivel modulante según la capacidad de la caldera | 88 |



## GLOSARIO

|                    |  |
|--------------------|--|
| <b>Actuador</b>    | Dispositivo alimentado hidráulica, neumática o electricamente el cual suministra fuerza o movimiento para abrir o cerrar una válvula.  |
| <b>Ajuste</b>      | Regulación de un instrumento de medición para lograr que su indicación se acerque al “valor verdadero” dentro de los límites de tolerancia de su clasificación.  |
| <b>Algoritmo</b>   | Lista de instrucciones donde se especifica una sucesión de operaciones necesarias para resolver cualquier problema de un tipo dado.  |
| <b>Byte</b>        | Unidad de datos que normalmente corresponde a un solo carácter, como una letra, un dígito o un signo de puntuación.  |
| <b>Calibración</b> | Conjunto de operaciones que establecen, bajo condiciones específicas, la relación entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento y los valores correspondientes de la magnitud dados por los patrones de referencia. |

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>Conductividad</b>             | Capacidad de una solución acuosa para conducir la corriente eléctrica.   |
| <b>Controlador</b>               | Estudia la variable medida y luego determina la acción que el dispositivo de control debe realizar para que dicha variable resulte igual a la referencia o <i>set point</i> .                            |
| <b>Control distribuído</b>       | Control digital realizado distribuyendo el riesgo del control único por ordenador en varios controladores o tarjetas de control de tipo universal con algoritmos de control seleccionables por software. |
| <b>Control todo/nada</b>         | Forma de control en el que el elemento final de control adopta dos posiciones fijas.   |
| <b>Elemento final de control</b> | Recibe la señal del controlador y modifica el caudal del fluido o agente de control. La válvula de control es el elemento final típico.  |
| <b>Elemento primario</b>         | Convierte la energía de la variable medida en una forma adecuada para la medida.   |
| <b>Mach</b>                      | Unidad de velocidad, igual a la de propagación de sonido en el medio.  |

|                     |   |
|---------------------|---|
| <b>Multiplexor</b>  | Dispositivo utilizado para transmitir simultáneamente dos o más señales a través de un canal único.   |
| <b>Offset</b>       | Desviación permanente que existe en régimen en el control proporcional cuando el punto de consigna está fijo.   |
| <b>Posicionador</b> | Controlador proporcional de posición con punto de consigna procedente del controlador utilizado para vencer las fuerzas de desequilibrio que actúan en la válvula de control. |
| <b>Programador</b>  | Instrumento que ajusta su propio punto de consigna o bien el punto de consigna de otro instrumento controlador de acuerdo con un programa prefijado.                          |
| <b>Protocolo</b>    | Conjunto de normas y convenciones para enviar información a través de una red.  |
| <b>Ruido</b>        | Cualquier perturbación eléctrica o señal accidental no deseadas que modifica la transmisión, indicación o registro de los datos deseados.                                     |

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| <b>Seguridad intrínseca</b> | Sistema de seguridad para atmósferas peligrosas que limita la capacidad de un circuito para producir chispas eléctricas que tengan la suficiente energía para provocar la ignición de la mezcla explosiva. |
| <b>Señal</b>                | Salida o información que emana de un instrumento. Información representativa de un valor cuantificado.   |
| <b><i>Set point</i></b>     | También llamado punto de consigna. Es una variable de entrada en el controlador que fija el valor deseado de la variable controlada. Puede fijarse manual o automáticamente o bien programarse.            |
| <b>Termopozo</b>            | Tubo de protección o vaina que permite aislar del proceso al elemento primario de temperatura.   |
| <b>Variable controlada</b>  | Dentro del lazo de control es la variable que se capta a través del transmisor y que origina una señal de realimentación.  |
| <b>Variable manipulada</b>  | Cantidad o condición del proceso variada por el elemento final de control.   |



## RESUMEN

El control de procesos ha alcanzado niveles de importancia y complejidad tan altos como los procesos mismos. Basta con observar una sencilla línea de producción de alimentos o bienes para convencerse que sin la tecnología actual de la instrumentación y control no sería posible alcanzar los indicadores de calidad y los volúmenes de producción exigidos por el consumidor y la competencia de mercado. Además dentro de la planta de producción se requiere de algunos suministros cuya generación y consumo son también controlados por medio de instrumentos, por ejemplo, la generación de vapor por medio de una caldera.

Este trabajo, como anuncia el título, presenta algunas opciones que la tecnología ofrece para controlar las principales variables de una caldera de vapor, con propósitos de garantizar calidad, seguridad y eficiencia. El ingeniero, basado en la experiencia, recomendaciones del fabricante, características del proceso y recursos disponibles, deberá seleccionar aquella estrategia de control que mejor integre sus requerimientos.

El trabajo incluye teoría de control industrial, de vapor y calderas cuyo contenido facilitará al lector la comprensión del capítulo dedicado específicamente al control de calderas. El capítulo cinco está dedicado a los transmisores de presión cuyo contenido como errores, calibración, ajuste y tipos de comunicación puede tomarse como base para todos los instrumentos de control.



## **OBJETIVOS**

### **General:**

Conocer las opciones que se encuentran en el mercado de la instrumentación para el control de las principales variables de una caldera de vapor con el propósito de seguridad, eficiencia y calidad.

### **Específicos:**

1. Conocer los principales elementos que forman un lazo de control, así como los términos y simbología utilizados en instrumentación, con el propósito de determinar las ventajas de la automatización.
2. Determinar explícita o implícitamente las ventajas de los controles modernos sobre los convencionales presentando las características de los mismos de manera que se justifique una selección.
3. Realizar un estudio de los transmisores de presión diferencial considerando la importancia que tienen en la medición de nivel de agua en calderas, y porque su comprensión facilitará el análisis de los transmisores en general.



## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como propósito principal presentar al lector una introducción a los principales lazos de control de una caldera de vapor haciendo algunas comparaciones entre las opciones disponibles, con el objeto de justificar nuestra selección.

Considerando la importancia del tema se incluyen bases teóricas que ayudarán a comprender la esencia del trabajo, cuyo contenido es de utilidad para todo aquel que este involucrado en la generación de vapor por medio de calderas y, según lo que le haya interesado, el lector podrá ampliar la información consultando la bibliografía incluida al final del trabajo.

Personalmente se ha observado que muchas veces es el ingeniero mecánico quien debe realizar ciertas selecciones en cuanto a instrumentación se refiere y aunque generalmente es asesorado por el proveedor especialista en automatización él no debe ser desconocedor de las razones por las que en su caldera se utilizó cierta estrategia para controlar variables tan importante como el nivel de agua, por ejemplo.

El primer capítulo incluye teoría de control en términos generales, el segundo trata los fundamentos termodinámicos del vapor, el tercero teoría de calderas, el cuarto contiene la información sobre control de calderas propiamente y el quinto capítulo está dedicado a los transmisores de presión considerando la preferencia que tienen en la medición de nivel de calderas y podemos tratar con ellos temas que son generales a los transmisores de señales.



# 1 CONTROL DE PROCESOS

En los procesos industriales es imprescindible el control de ciertos valores variables dentro de límites que garanticen la calidad esperada del producto. Es obvio que según el proceso de producción así serán las tolerancias aceptadas. En el génesis de la industrialización era el operario el encargado de controlar por simple experiencia que estos límites no fueran excedidos, claro está que las exigencias no eran estrictas debido a la, relativamente, baja complejidad de los procesos. No obstante debido a que la industria misma fue desarrollando nuevos procesos cada vez más complejos se hizo necesario automatizar estas actividades, con lo cual se ha logrado permanecer en los estrechos límites de tolerancia. Para este propósito se han creado instrumentos cuyas capacidades de medición y control aún continúan creciendo.

Los procesos industriales a controlar pueden dividirse ampliamente en dos categorías: procesos continuos y procesos discontinuos. En ambos casos las variables serán controladas de manera que se mantengan en valores fijos, variables con el tiempo o con otra variable.

El “**sistema de control**” es el conjunto de elementos que permite mantener las variables en esos valores deseados y puede definirse como aquel que compara el valor variable con un valor deseado y toma una acción correctiva según la desviación que exista.

El sistema requiere entonces de un instrumento que realice la medición, una unidad de control, un elemento final de control y el propio proceso.

En este capítulo conoceremos cuestiones básicas de los sistemas de control.

## **1.1 Definiciones en control**

Los instrumentos que son utilizados en las plantas de producción tales como químicas, alimenticias metalúrgicas, de energía, textiles, de papel, etc., tienen su propia terminología; los términos empleados definen características propias de los diversos instrumentos como: indicadores, registradores, controladores, transmisores y elementos finales de control.

Con el propósito de que los fabricantes, usuarios y todos los organismos que tienen que ver directa o indirectamente con el campo de la instrumentación y control de procesos industriales empleen el mismo lenguaje, se ha unificado la terminología empleada. La SAMA (*Scientific Apparatus Makers Association*) en su norma PMC 20-2-1970 sugiere los siguientes términos y definiciones (aparecen entre paréntesis los términos ingleses equivalentes de uso propagado).

### **1.1.1 Campo de medida (*range*)**

Conjunto de valores limitados por las indicaciones extremas y se expresa estableciendo los dos valores extremos. Por ejemplo: el campo de medida del instrumento de temperatura de la figura 1.1 es -30 a 50° C.



**Figura 1. Instrumento con rango -30 a 50°C**



### **1.1.2 Alcance (*Span*)**

Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida o rango del instrumento. En el instrumento de la figura 1 el alcance es de  $[50^{\circ}\text{C}] - [-30^{\circ}\text{C}] = 80^{\circ}\text{C}$ .

### **1.1.3 Error**

Es la diferencia algebraica entre el valor leído o transmitido por el instrumento y el valor real de la variable que esta siendo medida. Si el proceso está en condiciones de régimen permanente existe el llamado *error estático*. En condiciones dinámicas el error varía considerablemente debido a que los instrumentos tienen características comunes a los sistemas físicos: absorben energía del proceso y esta transferencia requiere cierto tiempo para ser transmitida, lo cual da lugar a retardos en la lectura del aparato. Siempre que las condiciones sean dinámicas, existirá en mayor o menor grado el llamado *error dinámico* (diferencia entre el valor instantáneo de la variable y el indicado por el instrumento): su valor depende del tipo de fluido del proceso, de su velocidad, del elemento primario, de los medios de protección, etc.

El *error medio* del instrumento es la media aritmética de los errores en cada punto de la medida determinados para todos los valores crecientes y decrecientes de la variable medida.

Cuando una medición se realiza con la participación de varios instrumentos, colocados unos a continuación de otros, el valor final de la medición estará constituido por los errores inherentes a cada uno de los instrumentos.

Si el límite del error relativo de cada instrumento es  $\pm a$ ,  $\pm b$ ,  $\pm c$ ,  $\pm d$ , etc., el máximo error posible en la medición será la suma de los valores anteriores, es decir:

$$\pm (a + b + c + d + \dots).$$

Debido a que es improbable que todos los instrumentos en un lazo tengan su error máximo al mismo tiempo en todas las circunstancias de la medida, suele tomarse como error total de una medición la raíz cuadrada de la suma algebraica de los cuadrados de los errores máximos de los instrumentos, esto es:

$$\pm \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + \dots}$$

Por ejemplo, calculemos el error obtenido al medir un caudal con una placa de orificio, un transmisor de presión diferencial electrónico de 4-20 mA corriente continua, un receptor y un integrador electrónicos, con los siguientes errores máximos por elemento:

|                                    |      |
|------------------------------------|------|
| Error de la placa de orificio..... | 2%   |
| Error del transmisor.....          | 0.5% |
| Error del receptor.....            | 0.5% |
| Error del integrador.....          | 0.5% |

El error total de la medición en porcentaje del valor real de la variable sería:

$$\sqrt{2^2 + 0.5^2 + 0.5^2 + 0.5^2} = 2.18\% .$$

#### **1.1.4 Exactitud**

La exactitud de una medición es la concordancia entre el resultado de una medición y el valor convencionalmente verdadero de la magnitud medida. Es un número que indica la cercanía entre el valor convencionalmente verdadero y el valor medido. Especifica la diferencia entre el valor medido y el valor convencionalmente verdadero de la magnitud y se considera como un concepto cualitativo. Esta diferencia puede ser relativamente grande o relativamente pequeña.

#### **1.1.5 Precisión**

La precisión es la tolerancia de medida o de transmisión del instrumento (intervalo donde es admisible que se sitúe la magnitud de la medida), y define los límites de los errores cometidos cuando el instrumento se emplea en condiciones normales de servicio durante un período de tiempo determinado (normalmente un año). Hay varias formas de expresar la precisión:

- a) *Tanto por ciento del alcance.* Ejemplo: Para un medidor de temperatura, con alcance de 200 °C y una precisión de  $\pm 0.5\%$  del alcance, cuando indica 150 °C el valor real de la presión estará comprendido entre  $150 \pm 0.5 \cdot 200 / 100 = 150 \pm 1$  °C, es decir, entre 149 y 151°C.
- b) *Directamente en unidades de la variable medida.* Ejemplo: precisión de  $\pm 1$  °C.
- c) *Tanto por ciento de la lectura efectuada.* Ejemplo: precisión de  $\pm 1\%$  de 150 °C, es decir,  $\pm 1.5$  °C.
- d) *Tanto por ciento del valor máximo del campo de medida.* Ejemplo: precisión de  $\pm 0.5\%$  de 300 °C, esto es  $\pm 1.5$  °C.

La precisión varía en cada punto del campo de medida si bien, el fabricante la especifica en todo el margen del instrumento indicando a veces su valor en algunas zonas de la escala. Por ejemplo: un manómetro puede tener una precisión de  $\pm 1\%$  en toda la escala y de  $\pm 0.5\%$  en la zona central. Cuando se desea obtener la máxima precisión del instrumento en un punto determinado de la escala, puede calibrarse únicamente para este punto de trabajo, sin considerar los valores restantes del campo de medida.

Hay que señalar que los valores de precisión de un instrumento se consideran en general establecidos para el usuario, es decir, son los proporcionados por los fabricantes de los instrumentos. Sin embargo, estos últimos suelen considerarse también los valores de calibración en fábrica y de inspección. Por ejemplo, un instrumento que en fábrica tiene una precisión de calibración de  $\pm 0.8\%$  en inspección le corresponde  $\pm 0.9\%$  y la dada al usuario es  $\pm 1\%$ .

Con lo anterior se pretende tener un margen de seguridad para compensar los efectos de las diferencias de apreciación de las personas que efectúan la calibración, las diferentes precisiones de los instrumentos de medida utilizados, las posibles alteraciones debidas al desplazamiento del instrumento de un punto a otro, los efectos ambientales y de envejecimiento, etc.

Analicemos la diferencia entre el término precisión y el término exactitud que constantemente dan lugar a confusiones. Un manómetro de escala 0-10 bar que repita la medida de 5 bar constantemente en las mismas condiciones, dará diferentes lecturas alrededor de 5 bar, que estarán distribuidas según una curva de campana (curva de Gauss). El manómetro será tanto más exacto cuanto más próximo esté el valor medio de las medidas al valor verdadero de 5 bar y será más preciso cuanto menor sea la dispersión de las medidas. Por lo tanto, los instrumentos de medidas estarán diseñados por los fabricantes para que sean precisos, y como periódicamente se descalibran, deben reajustarse para que sean exactos.

#### **1.1.6 Banda muerta**

Es el campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o la señal de salida del instrumento, es decir, que no produce respuesta. Viene dada en porcentaje del alcance de la medida.

### **1.1.7 Sensibilidad**

La sensibilidad de un instrumento de medición es el cambio en su respuesta dividido por el correspondiente cambio del estímulo. También podemos decir que la sensibilidad de un instrumento es la relación entre la señal de salida o respuesta y la señal de entrada o magnitud medida. La sensibilidad puede depender del valor del estímulo. Por ejemplo para un transmisor de presión electrónico la sensibilidad se puede expresar como mA/bar, que indica cuántos mA de c.c. se generarán por cada bar de presión que actúe sobre el elemento sensante.

### **1.1.8 Histéresis**

Es la propiedad de un instrumento de medición mediante la cual la indicación del valor de una magnitud cuando se toma en forma creciente difiere del mismo cuando se toma en forma decreciente. Es decir que la respuesta a una señal de entrada dada depende de la secuencia de las señales de entrada (o los valores de las magnitudes de influencia) precedentes. Para comprobar la histéresis se hacen mediciones de magnitudes variables; primero la magnitud se puede hacer crecer desde cero hasta un valor máximo y luego se le hace decrecer hasta cero. La diferencia entre los valores crecientes y los valores decrecientes indica que el instrumento tiene histéresis, siempre y cuando esta histéresis no sea propia del sistema en el que se efectúa la medición.

## 1.2 Clases de Instrumentos

Debido a la relativa complejidad y para comprender mejor su función se han clasificado los instrumentos de medición y control en dos categorías básicas que estudiaremos brevemente.

### 1.2.1 En función del instrumento

De acuerdo al trabajo del instrumento en el lazo de medición o control se tiene los siguientes tipos de instrumentos:

- a) *Ciegos*: son aquellos que no tienen indicación visible de la variable. Es de señalar que los instrumentos como interruptores de presión o temperatura que tienen una escala únicamente para ajustar el punto de disparo también son ciegos ya que no muestran el valor instantáneo de la variable medida. En la figura 2 puede verse un transmisor de presión con salida de 4-20 mA pero sin indicación.

**Figura 2. Transmisor de presión ciego**



b) *Indicadores*: cuentan con un índice que se desplaza sobre una escala graduada en un rango apropiado indicando el valor de la variable. Actualmente se ha difundido el uso de los indicadores digitales que muestran el valor de la magnitud medida directamente en forma numérica con dígitos. (Figura 3).

**Figura 3. Indicador digital**



c) *Registradores*: registran la variable con trazo continuo o a puntos, pueden ser electromecánicos con trazo sobre una gráfica de papel circular o rectangular o electrónicos con diferentes presentaciones al operador. (Figura 4)

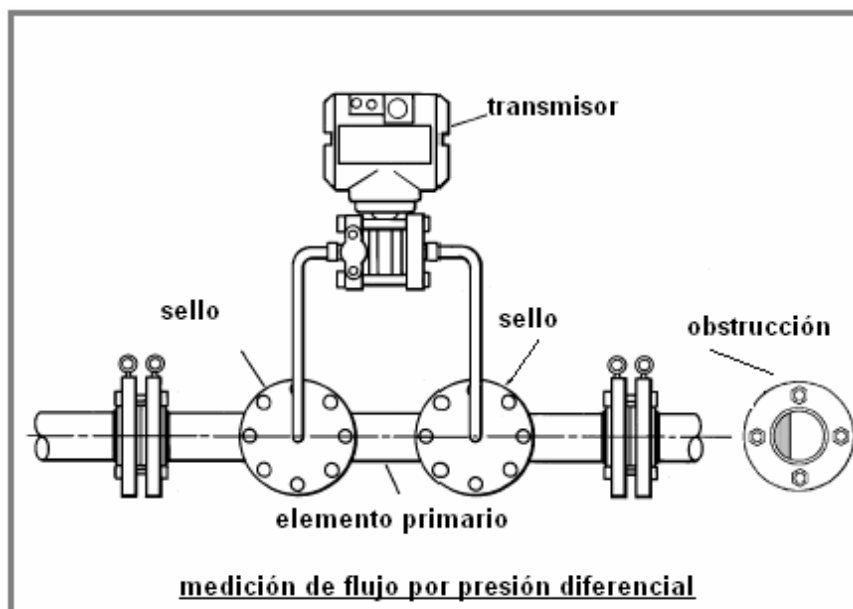


**Figura 4. Registrador electrónico**



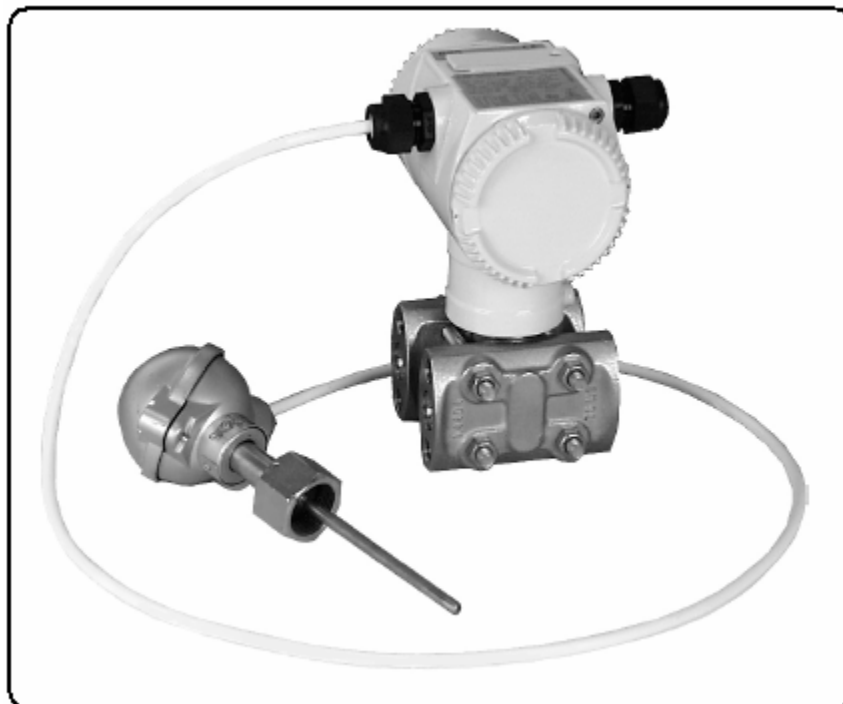
- d) *Elementos primarios*: es el que esta en contacto directo con la variable y dispuesto a transmitir cualquier transformación de energía en el medio medido. (Figura 5)

**Figura 5. Elemento primario**



e) *Transmisores*: capta la señal del elemento primario de medida y la transmite a distancia en forma eléctrica, neumática, hidráulica, mecánica y ultrasónica. La señal neumática más utilizada es de 3-15 psi y la electrónica es de 4 – 20 mA cc, sin embargo en los últimos años se están aumentando las aplicaciones de las señales digitales en algunos transmisores "inteligentes" estas señales son idóneas para utilizarse con un ordenador, la precisión de estos es unas diez veces mayor que la señal clásica de 4-20 mA. (Figura 6)

**Figura 6. Transmisor multivariable de presión y temperatura**



- f) *Transductores*: dispositivo que recibe una o varias señales provenientes de la variable medida y pueden modificarla o no en otra señal.
- g) *Controladores*: comparan el valor de la variable que esta siendo controlada y el valor deseado (*set point*) y ejercen una acción correctiva según la magnitud de la desviación.
- h) *Elemento final de control*: es el elemento del lazo que recibe la señal del controlador y modificará el caudal del fluido o agente de control. Puede ser una válvula neumática, un servomotor una válvula motorizada o variador de frecuencia, etc. (Figura 7)

**Figura 7. Elementos finales de control**



### **1.2.2 En función de la variable de proceso**

Esta clasificación, como su nombre lo indica, se referirá a la variable de proceso que tratemos de medir. En la actualidad, se pueden medir, casi sin excepción, todas las variables de proceso existentes, sin embargo, algunas se medirán de forma directa y otras indirectamente. En esta clasificación los instrumentos se dividen en instrumentos de caudal, nivel, presión, temperatura, velocidad, ph, conductividad, frecuencia, fuerza, turbidez, dureza, etc.

Esta clasificación corresponde específicamente al tipo de señales medidas independientemente del sistema empleado en la conversión de la señal de proceso, por ejemplo, un medidor de caudal tipo turbina mide en primera instancia la velocidad del fluido, magnitud que luego es utilizada para calcular el caudal, es decir la magnitud que nos interesa es medida indirectamente.

### **1.2.3 Identificación y simbología básica**

#### **Simbología**

Los símbolos y diagramas son usados en el control de procesos para indicar la aplicación en el proceso, el tipo de señales empleadas, la secuencia de componentes interconectadas y de alguna manera, la instrumentación empleada. La Sociedad de Instrumentistas de América (ISA por sus siglas en inglés *Instruments Society of America*) publica normas para símbolos, términos y diagramas que son generalmente reconocidos en la industria. Esta sección esta basada en esas normas y ayudará a utilizar e interpretar los símbolos utilizados en el control de procesos.

## Identificación del Instrumento

Los instrumentos son generalmente identificados por números en una etiqueta. El número de la etiqueta identifica (1) la función en el proceso y (2) el lazo de control en el cual está localizado. La figura 8 indica cómo las letras y los números son seleccionados y agrupados para lograr una rápida identificación.

**Figura 8. Letras y números utilizados para identificación de instrumentos**

| <b>Primera letra</b>            | <b>letras subsecuentes</b> | <b>número de lazo de control</b> | <b>sufijo (si es usado)</b> |
|---------------------------------|----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| <b>F</b>                        | <b>RC</b>                  | <b>102</b>                       | <b>A</b>                    |
| <b>identificación funcional</b> |                            | <b>identificación del lazo</b>   |                             |

La función o variable de proceso puede ser fácilmente asociada con el tipo de medición hecha en el proceso. Así, el FRC (*Flow Recorder Controler* por sus siglas en inglés) mostrado en la figura 8 identifica un controlador registrador de flujo. Las letras del alfabeto son utilizadas para formar la combinación de estos nombres. En la tabla I se muestran las letras correspondientes a cada término.

**Tabla I. Letras de identificación de instrumentos**

| Primera Letra             |                       | Segunda letra             |                           |                       |
|---------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Variable medida           | Letra de modificación | Función de lectura pasiva | Función de salida         | Letra de modificación |
| A. Análisis               |                       | Alarma                    |                           |                       |
| B. Llama                  |                       | Libre                     | Libre                     | Libre                 |
| C. Conductividad          |                       |                           | Control                   |                       |
| D. Densidad o peso        | Diferencial           |                           |                           |                       |
| E. Tensión (Fem)          |                       | Elemento primario         |                           |                       |
| F. Caudal                 | Relación              |                           |                           |                       |
| G. Calibre                |                       | Vidrio                    |                           |                       |
| H. Manual                 |                       |                           |                           | Alto                  |
| I. Corriente eléctrica    |                       | Indicación o indicador    |                           |                       |
| J. Potencia               | Exploración           |                           |                           |                       |
| K. Tiempo                 |                       |                           | Estación de control       |                       |
| L. Nivel                  |                       | Luz piloto                |                           | Bajo                  |
| M. Humedad                |                       |                           |                           | Medio o intermedio    |
| N. Libre                  |                       | Libre                     | Libre                     | Libre                 |
| O. Libre                  |                       | Orificio                  |                           |                       |
| P. Presión o vacío        |                       | Punto de prueba           |                           |                       |
| Q. Cantidad               | Integración           |                           |                           |                       |
| R. Radioactividad         |                       | Registro                  |                           |                       |
| S. Velocidad o frecuencia | Seguridad             |                           | Interruptor               |                       |
| T. Temperatura            |                       |                           | Transmisión o transmisor  |                       |
| U. Multivariable          |                       | Multifunción              | Multifunción              | Multifunción          |
| V. Viscosidad             |                       |                           | Válvula                   |                       |
| W. Peso o fuerza          |                       | Vaina                     |                           |                       |
| X. Sin clasificar         |                       | Sin clasificar            | Sin clasificar            | Sin clasificar        |
| Y. Libre                  |                       |                           | Relé o compensador        | Sin clasificar        |
| Z. Posición               |                       |                           | Elemento final de control |                       |






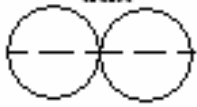
Los números para la identificación del lazo de control tienen una base diferente y sirve para un propósito diferente. El FRC de la figura 8 por ejemplo, es también el número del lazo del instrumento en este caso 102 en un proceso. Este número puede ser modificado posteriormente para indicar la localización del instrumento.

Por ejemplo, la figura 8 se podría numerar también como FRC 25-102 ó 25 FRC 102. Ambos códigos se leen de la siguiente manera: controlador registrador de flujo No. 102, construcción 25. Normalmente cuando se tiene varios instrumentos del mismo tipo se agrega una letra después del número.

Por ejemplo, si el registrador de flujo recibe señales de dos transmisores de flujo separados, la etiqueta de un transmisor se podría leer FT 102 A (*flow transmitter* por sus siglas en inglés) y la otra se podría identificar por FT 102 B.

En los diagramas los números de la etiqueta son colocados dentro de círculos. La figura 9 muestra varias normas de arreglos de círculos. Nótese que la identificación funcional está siempre en la mitad superior del globo mientras que el número del lazo de control está en la mitad inferior. Una línea dibujada en el centro indica un instrumento montado en el panel de control.

**Figura 9. Símbolos generales**

|   |   |  |
|---|---|--|
| <p>∅ aprox<br/>11 mm</p>  <p>local</p> |  <p>montaje en<br/>panel 1</p> |  <p>montaje detrás del<br/>panel</p>                    |
| <p><b>instrumento para una variable medida</b></p>  |   |  |
|  <p>montaje local</p>                  |  <p>montaje en panel</p>       | <p>aux</p>  <p>montaje detrás de<br/>panel auxiliar</p> |
| <p><b>instrumento para dos variables medidas</b></p>  |   |  |

Un círculo sin línea en el centro indica que está montado en forma local o en el campo. Una línea punteada indica que está montado atrás del tablero de control. Cuando dos círculos son dibujados unidos (figura 9) están indicando múltiples funciones.

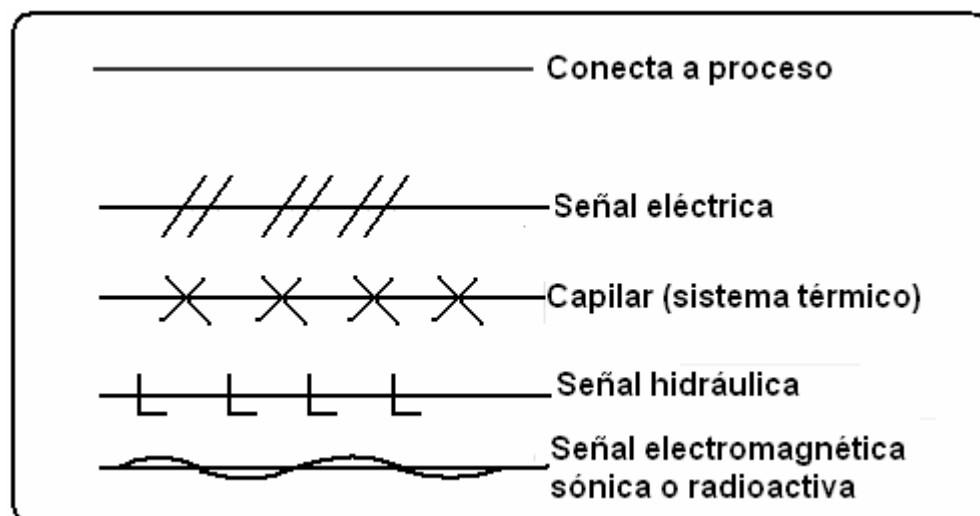
Por ejemplo, si el FRC (control registrador de flujo) mostrado en la figura 8 incluye una segunda plumilla para graficar presión, un círculo doble aparecería en el dibujo para indicar su función.

Un número colocado fuera del círculo identifica el tablero de control donde el instrumento está instalado (Figura 9).



Las señales de instrumentación utilizadas en el control de procesos son usualmente de los siguientes tipos: Neumática, electrónica (eléctrica), capilar, hidráulica, sónica o indicando radioactividad. Cada señal tiene un símbolo diferente y los símbolos son mostrados en la figura 10.

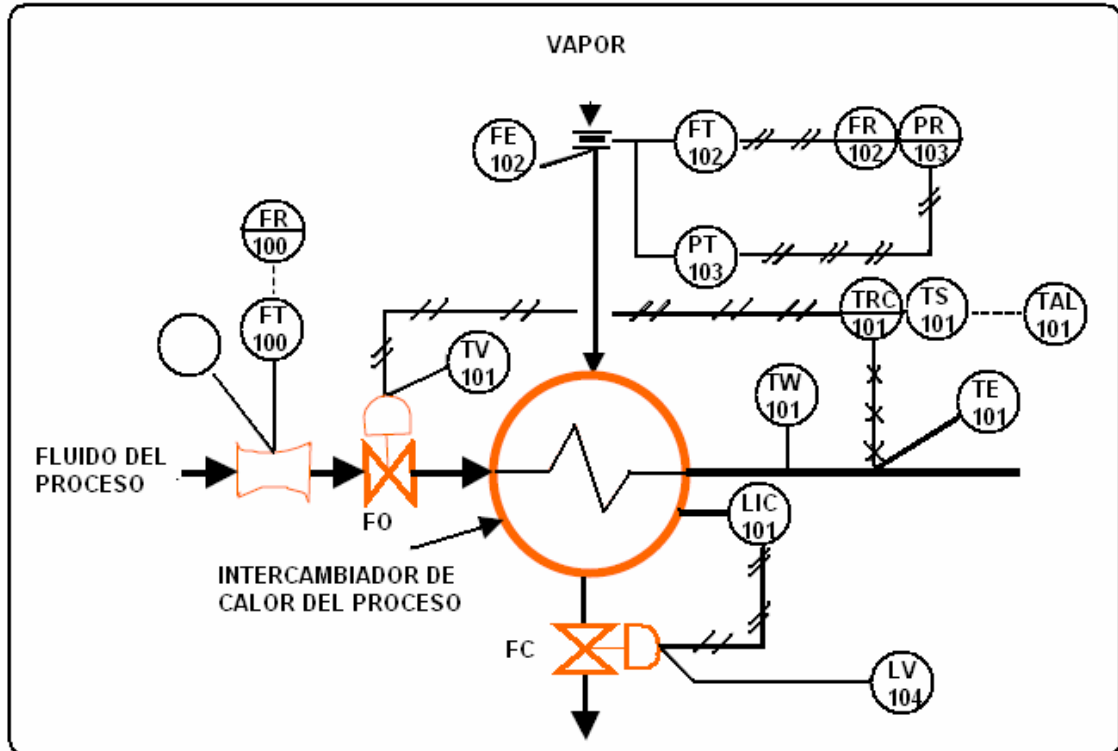
**Figura 10. Líneas de conexión de instrumentos**



### **Símbolos en el Control de Procesos**

Los símbolos de los instrumentos que representan un proceso de intercambio de calor están mostrados en la figura 11. Nótese que se utilizan varios elementos primarios y varios tipos de señales son utilizados. Aunque las señales eléctricas y neumáticas no son comúnmente utilizadas juntas, ambas son utilizadas en este diagrama para demostrar aplicaciones típicas de los símbolos de instrumentos.

Figura 11. Símbolos de instrumentos en un proceso simple



Así el registrador de flujo 100 que está montado en el panel, tiene una entrada neumática y el controlador registrador de temperatura 101 que está montado en el panel, tiene un sistema de llenado térmico o entrada capilar.

Usualmente se puede obtener considerable información sobre procesos e instrumentación estudiando un dibujo similar a la figura 11. Aquí los lazos combinados para la medición del flujo de vapor (FR 102) y la presión del vapor (PR 103) ilustran cómo son aplicados los símbolos.

Como un ejemplo, notemos el símbolo para medición del flujo de vapor. Este componente aparece en la figura 15 como una placa de orificio biselado (FE 102).

La salida neumática del transmisor montado localmente FT 102 (figura 11) envía una señal al registrador que está en el panel de control con la identificación FR 102. El 1 identifica la localización en el panel. Información similar del lazo de presión (PT 103 y PR 103) incluye el hecho que la presión de salida es registrada. Cuando se miden fluidos compresibles (gas, aire, vapor), el uso de la presión de entrada o la de salida afectará significativamente la cantidad final o el volumen que se calcule con los datos registrados en las gráficas. En el ejemplo mostrado en la figura 11, el vapor fluye al intercambiador para calentar el fluido del proceso.

La línea que une el transmisor de presión al proceso es colocada en el intercambiador en el lado de salida de la placa de orificio, lo cual indica que se registra la presión de salida. En el lazo de flujo 100, el elemento de flujo o dispositivo primario difiere del que se utilizó en el lazo de vapor. De acuerdo a la figura 15 éste es un tubo de Venturi. La señal de salida del transmisor es electrónica.

En el lazo de temperatura (TRC 101), el elemento final de control es una válvula. Las letras FO justo debajo del símbolo de la válvula, indican que la válvula abre si el diafragma se rompe, o la señal de aire falla, o si existe una condición similar. El segundo círculo unido al TRC (TS 101) significa que se utiliza un interruptor para activar un TAL (alarma por baja temperatura por sus siglas en ingles *Temperature Alarm Low*), la cual también está localizada en el panel de control.

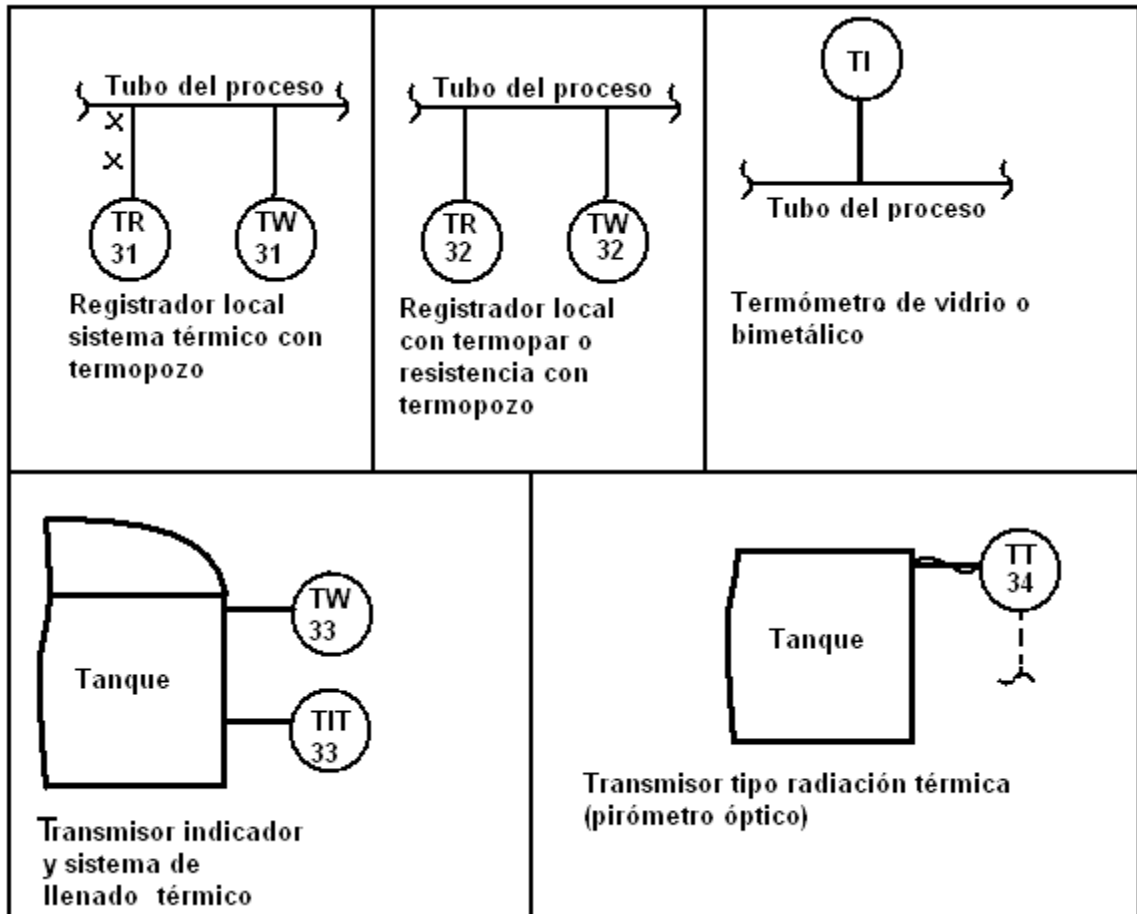
## **Reconocimiento de Símbolos**

Si se requiere determinar el significado de las conexiones de los lazos, debemos estar capacitados para reconocer los símbolos representativos de los elementos primario y final. Los dispositivos primarios para temperatura, presión, nivel y flujo son mostrados de la figura 12 a la 15. La figura 16 está dedicada a los dispositivos finales. Existen otros dispositivos primarios, sin embargo, si dominamos los aquí presentados los otros serán fáciles de reconocer.

### **Temperatura**

En la figura 12 los TW (termopozos por sus siglas en inglés *termo well*) son incluidos dentro de los elementos primarios. Por ejemplo el elemento primario TR 31 indica un registrador de temperatura que está directamente conectado a la tubería del proceso por un sistema de llenado térmico. Un TW es usualmente instalado de 10 a 12 pulgadas (250 a 475 mm) dentro del elemento térmico.

**Figura 12. Elementos primarios para el control de temperatura**

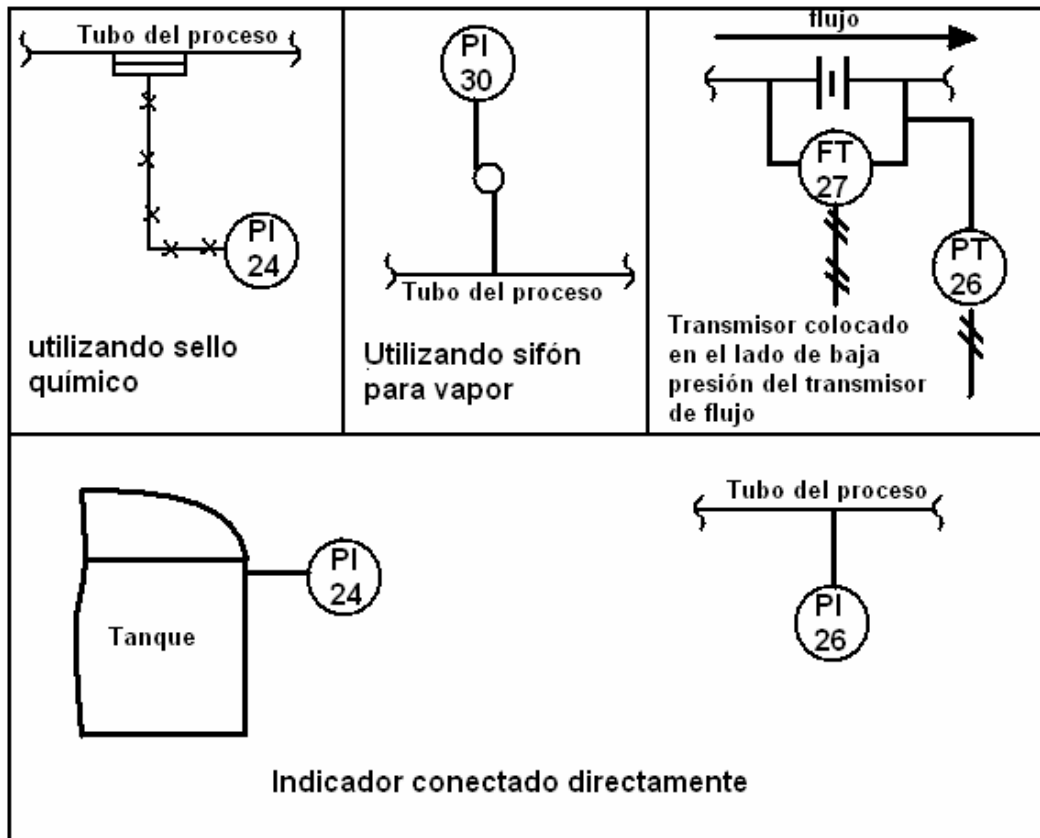


Para probar los instrumentos instalados con exactitud y sin mover o reemplazar el elemento primario, se inserta un termómetro de vidrio, termopar de prueba o un bulbo de resistencia en el termopozo. Este procedimiento es más exacto que uno donde el elemento primario es reemplazado durante la prueba. En el último caso, la temperatura del TW podría cambiar durante el cambio del nuevo elemento primario y la lectura sería inexacta.

## Presión

La figura 13 muestra algunas aplicaciones de medición de presión más comunes en instrumentación de procesos.

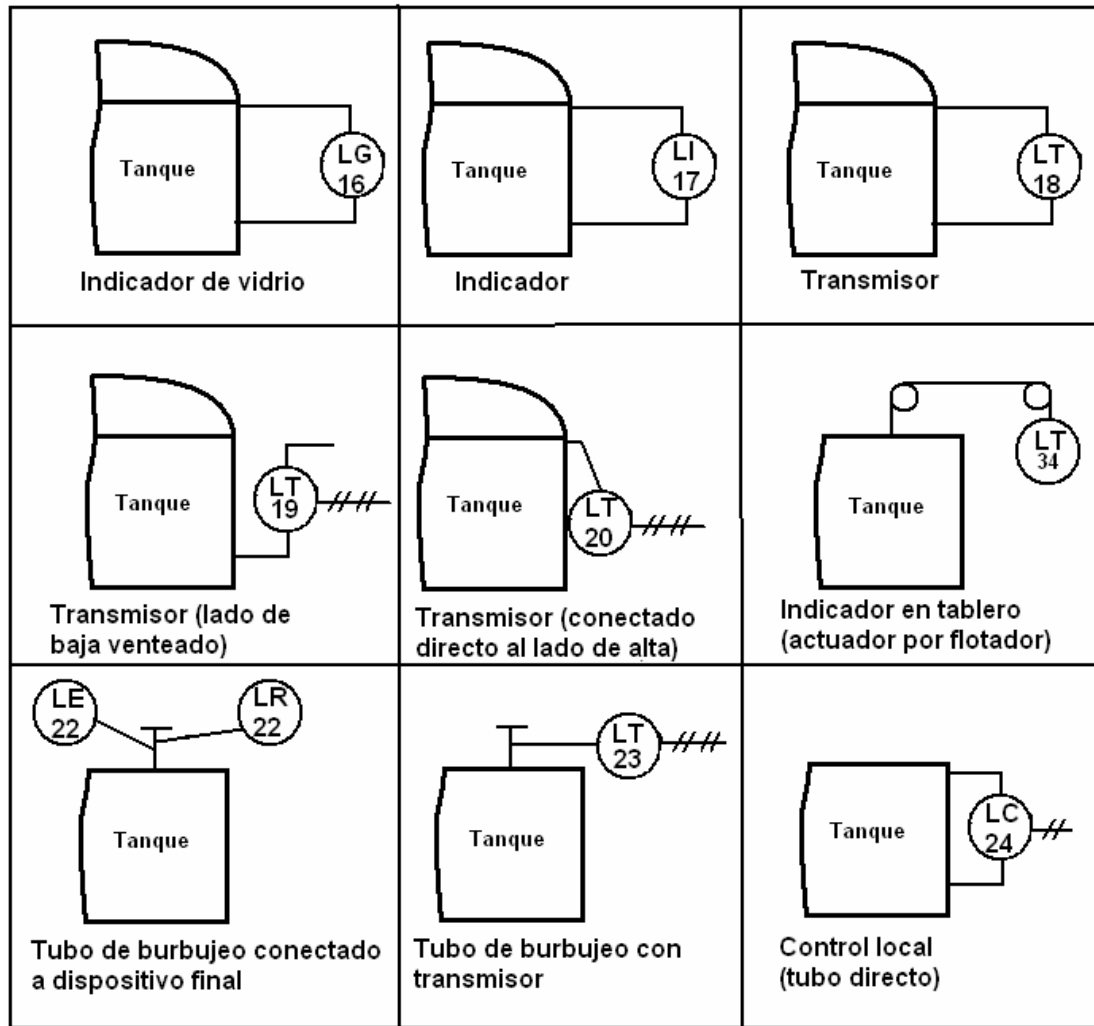
**Figura 13. Elementos primarios para el control de presión**



## Nivel

La figura 14 muestra que los símbolos de nivel y las instalaciones actuales tienen mucho en común. Notemos la diferencia entre LT 18 y LT 19. El LT 18 tiene una derivación diferencial aplicada a un recipiente cerrado o presionado y el LT 19 es conectado a un tanque abierto, además el lado de baja presión es venteado a la atmósfera.

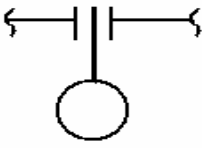
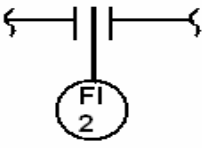
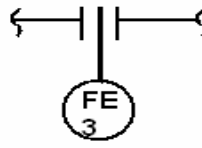
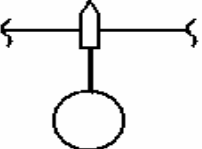
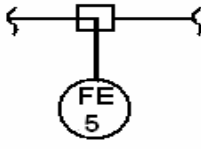
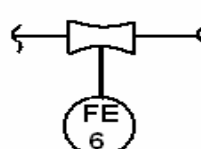
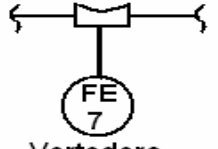
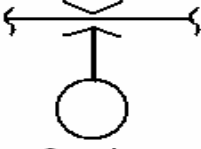
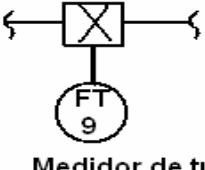
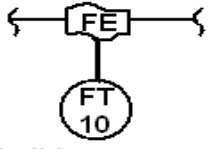
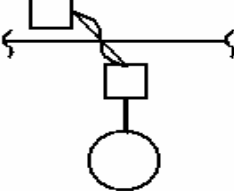

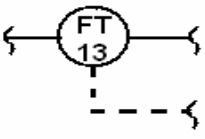

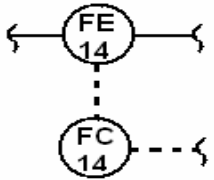
**Figura 14. Elementos primarios para el control de nivel**



## Flujo

En la figura 15 el FE-5 es un tubo Pitot y el FE 9 (*Flow element*) es un medidor de tipo propela, ambos dibujos se asemejan en los mecanismos de los medidores de flujo que representan, porque se trata que los símbolos sean lo más parecido posible a los aparatos medidores.

**Figura 15. Elementos primarios para el control de flujo**

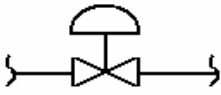



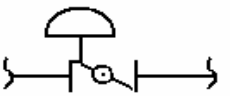


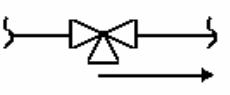
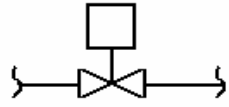
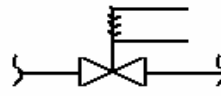

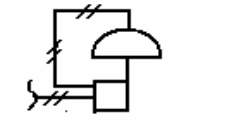
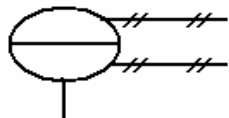
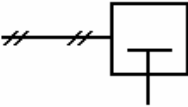
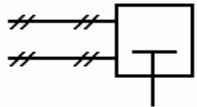
|  |   |   |
|--|---|---|
|  <p>Placa de orificio con visel</p>                       |  <p>Placa de orificio con indicador de flujo</p> |    |
|  <p>Placa de orificio con accesorios de cambio rápido</p> |  <p>Tubo pitot</p>                               |  <p>Venturi o tobera</p>                                     |
|  <p>Vertedero</p>  |  <p>Canal</p>                                   |  <p>Medidor de turbina o propela</p>                        |
|  <p>Medidor electromagnético con transmisor</p>         |  <p>Medidor ultrasónico</p>                    |  <p>Rotámetro indicador de caudal</p>                      |
|  <p>Medidor de objetivo (target)</p>                    |  <p>Medidor de desplazamiento positivo</p>     |  <p>Elemento sin clasificar conectado a un controlador</p> |



## **Elementos finales de control**

Las válvulas, elementos finales en los lazos de control se muestran en la figura 16 las válvulas son los elementos de control más comunes, sin embargo se utilizan también otros elementos finales de control como son los amortiguadores, controles de velocidad o circuitos de posición. Nótese que cualquiera de los actuadores listados puede ser utilizado con cualquiera de los cuerpos de las válvulas mostradas. Usualmente se utilizan sólo los símbolos más simples y se reservan las especificaciones detalladas para los diagramas de los lazos de control.

**Figura 16. Elementos finales de control**

|  |   |   |
|--|---|---|
|  <p>Válvula de control<br/>Diafragma Vrs. resorte<br/>falta de aire abre (FO)<br/>falta de aire cierra (FC)</p> |  <p>Empuja para cerrar<br/>(Falla de aire abre)</p>  |  <p>Empuja para abrir<br/>(Falla de aire cierra)</p> |
|  <p>Válvula de mariposa<br/>falta de aire abre (FO)<br/>falta de aire cierra (FC)</p>                           |  <p>Empuja para abrir<br/>(Falla de aire cierra)</p> |  <p>Empuja para cerrar<br/>(Falla de aire abre)</p>  |
|  <p>Tres vías<br/>desviación hacia<br/>abajo</p>  |  <p>Tres vías<br/>desviación hacia<br/>derecha</p> |  <p>Solenoides</p>                                 |
|  <p>Solenoides alternada</p>  |  <p>Válvula de bola</p>                            |  <p>Válvula con<br/>posicionador</p>               |
|  <p>Diafragma vrs.<br/>diafragma</p>  |  <p>Pistón</p>                                     |  <p>Pistón de doble<br/>acción</p>                 |

### 1.3 Válvulas de control

Puede definirse una válvula como el dispositivo utilizado para el control del flujo de fluido, consistiendo de una armazón retenedora del fluido, uno o más puertos y un elemento de cierre que abre restringe o cierra por completo los puertos. La válvula de control propiamente es una válvula que controla la tasa de flujo o la dirección de flujo en un sistema de fluido, es el elemento final de control a través del cual pasa un fluido, que ajusta el paso del flujo según la señal recibida desde un controlador.

#### 1.3.1 Tipos de válvulas

Las válvulas pueden ser de varios tipos según sea el diseño del cuerpo y el movimiento que realiza el obturador. Una clasificación general es **válvulas lineales y válvulas rotativas**, en las primeras el obturador se mueve en la dirección de su propio eje, en las segundas el obturador realiza un movimiento de rotación para cumplir su función.

Dentro de esta clasificación general veremos los tipos más utilizados en el control de procesos.

### 1.3.1.1 Válvula de globo

Válvula con un elemento de cierre con movimiento lineal, es la más utilizada en el control de procesos, se caracteriza por una cavidad globular formada alrededor del puerto. Pueden ser de asiento sencillo o asiento doble. Las de asiento sencillo se utilizan cuando la presión del fluido es baja y se requieren fugas mínimas, las de asiento doble se utilizan cuando existen altas presiones diferenciales (diferencia entre la presión de entrada y la presión de salida de la válvula) tienen el inconveniente de que en posición de cierre presentan fugas mayores que la válvula de simple asiento. (Figura 17).

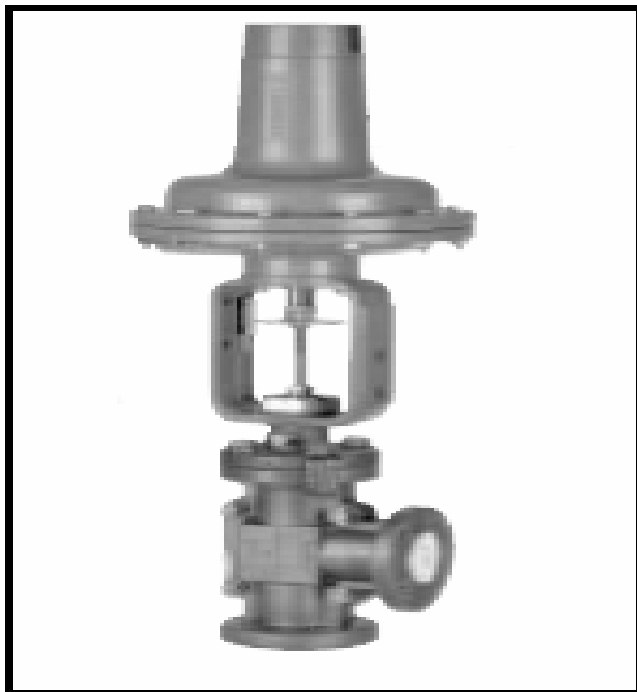
**Figura 17. Válvula de globo**



### 1.3.1.2 Válvula en ángulo

Esta válvula permite obtener un flujo de caudal regular sin excesivas turbulencias y es adecuada para disminuir la erosión cuando ésta es considerable por las características del fluido o por la excesiva presión diferencial. El diseño de la válvula es idóneo para fluidos que vaporizan (*flashing*), para trabajar con grandes presiones diferenciales y para los fluidos que contienen sólidos en suspensión. (Figura 18)

**Figura 18. Válvula en ángulo**



### 1.3.1.3 Válvula de mariposa

El cuerpo está formado por un anillo cilíndrico dentro del cual gira transversalmente un disco circular. La válvula puede cerrar herméticamente mediante un anillo de goma empotrado en el cuerpo. Un servomotor exterior acciona el eje del disco y ejerce su par máximo cuando la válvula esta totalmente abierta, siempre que la presión permanezca constante. En la selección de la válvula es importante considerar las presiones diferenciales correspondientes a las posiciones de completa apertura y de cierre; se necesita una gran fuerza del actuador para accionar la válvula en caso de una caída de presión elevada.

Las válvulas de mariposa se emplean para el control de grandes caudales de fluidos a baja presión.

**Figura 19. Válvula de mariposa**



#### 1.3.1.4 Válvula de bola

El cuerpo de la válvula tiene una cavidad interna esférica que alberga un obturador en forma de esfera o de bola. La válvula tiene un corte adecuado que fija la curva característica de la válvula, y gira transversalmente accionada por un servomotor exterior. El cierre hermético se logra mediante un aro de "resina anti-adherente" incorporado al cuerpo contra el cual asienta la bola cuando la válvula esta cerrada. En posición de apertura total, la válvula equivale aproximadamente en tamaño a 75% del tamaño de la tubería. La válvula de bola se emplea principalmente en control de caudal de fluidos negros, o bien en fluidos con gran porcentaje de sólidos en suspensión.

**Figura 20. Válvula de bola**



### 1.3.2 Cuerpo de la válvula

Es la principal frontera de presión de la válvula que además provee los extremos de conexión a la tubería, el camino del fluido y soporta las superficies de sello y el elemento de cierre de la válvula. El cuerpo de la válvula debe soportar la temperatura y la presión del fluido sin pérdidas, tener un tamaño adecuado para el caudal y ser resistente a la erosión o a la corrosión producida por el fluido.

El cuerpo y las conexiones a las tuberías (bridadas o roscadas) están normalizadas de acuerdo con las presiones y temperaturas de trabajo en las normas DIN y ANSI. Las conexiones roscadas se utilizan hasta 2", las bridas (*flanges*) pueden ser planas, con resalte o machihembradas.

El cuerpo de la válvula puede ser de hierro, bronce, acero y acero inoxidable, aunque pueden fabricarse de otros materiales para aplicaciones especiales.

Cada válvula de control debe diseñarse y seleccionarse para proveer una operación y control confiable a las condiciones de operación y diseño especificadas. El dimensionamiento de una válvula de control generalmente debe basarse en ISA S75.01 que son las ecuaciones de flujo para dimensionar válvulas de control, procedimiento que veremos más adelante.

El fabricante debe de seleccionar una válvula de control junto con su actuador y evaluar cuidadosamente el requerimiento mínimo de funcionamiento de sus internos. Los cálculos de capacidad de la válvula para todas las condiciones de operación deben de darse. Las bases de cálculo y resultados deben ser mostradas por medio de cálculos en forma manual o por computadora.



La capacidad seleccionada de los internos de la válvula de control Cv o Kv debe de cumplir con lo siguiente:

Para una característica de igual porcentaje los internos deben operar al 95% de carrera a máximo flujo.

Para característica lineal y de apertura rápida los internos deben de operar al 90 % a máximo flujo.

Cuando se menciona 95 o 90 % se refiere a la abertura que debe de mostrar la válvula de control con el flujo máximo. A la capacidad requerida Cv que cumpla con el criterio mencionado se le llama "Cv requerida". A la capacidad Cv actual de la válvula se le llama "Cv seleccionada". Las aplicaciones específicas pueden requerir una capacidad Cv sobre dimensionada, lo cual debe ser especificado por el usuario.

Debe de tomarse en cuenta un factor llamado FP cuando la válvula de control se va a colocar entre reductores u otros accesorios, por lo que la Cv calculada debe ser corregida debido a la reducción de capacidad de la válvula.

Los internos de una válvula de control pueden ser muy sencillos pero reducen su área de paso mientras más ocupan espacio dentro del cuerpo. El cuerpo de una válvula de control con internos reducidos debe de ser considerado para aplicaciones con las condiciones siguientes:

- a) Caídas de presión > 50 Bar
- b) Velocidades de salida de gas o vapor que excedan 0.3 Mach.
- c) Nivel de ruido alto > 85 decibeles audibles.
- d) Estrangulación de flujo.

- e) Vaporización instantánea sostenida > 5 % del líquido que se trate.
- f) Si se proyecta aumento de capacidad en el futuro.

### **1.3.3 Tapa de la válvula**

Tiene por objeto unir la válvula al actuador y en un agujero que posee en el centro desliza el eje del obturador accionado por el actuador. Este vástago por lo general tiene un índice que señala en una escala la posición de apertura o cierre de la válvula.

Para que el fluido no se escape a través de la tapa se dispone de una caja de empaquetadura entre la tapa y el vástago. La empaquetadura ideal debe ser elástica, tener un bajo coeficiente de rozamiento, ser químicamente inerte y ser un aislante eléctrico, con el fin de no formar un puente galvánico con el vástago que dé lugar a una corrosión de partes de la válvula. La empaquetadura que generalmente se utiliza es de teflón, aunque existen materiales especiales para aplicaciones de elevada temperatura o temperatura criogénicas.

### **1.3.4 Obturador y asientos (internos de la válvula)**

Los internos de una válvula de control en inglés los llaman *trim*. Los internos tienen una parte fija y una parte móvil que es la que permite que la válvula se mantenga abierta o cerrada.

La parte móvil es el ensamble del tapón con la parte del vástago que estará en contacto con el medio. La parte fija de los internos es muy sencilla en aplicaciones convencionales, pero en aplicaciones para servicio severo es una jaula con diferentes diseños, por ejemplo jaulas concéntricas, placas perforadas, pila de discos, etc., y con las piezas necesarias para acomodar la jaula por dentro.

Los internos deben de ser del tipo de cambio rápido, por lo que ningún componente debe de ir soldado o roscado en el cuerpo o bonete.

Como en algunas válvulas de control se nota que el tapón a veces se pega y queda fijo en una posición, por lo tanto se debe de especificar que los internos deben de tener un anillo igualador de presión alrededor del tapón para minimizar la vibración y que no se flexione el tapón por flujo concentrado en una sola porción del tapón. El fabricante debe de cumplir con este diseño para cumplir con los requerimientos de la especificación. Para las aplicaciones de servicio severo, cuando un fabricante proponga el diseño de ciertos internos, debe de haber probado durante cinco años este diseño lo cual debe de certificarlo.

Los fluidos líquidos o gaseosos al pasar por una válvula de control con gran caída de presión pueden provocar ciertos fenómenos, los cuales normalmente son destructivos. Los líquidos pueden provocar *cavitación* y *“flashing”*, y los gases pueden provocar *ruido* y *su fenómeno asociado que es la vibración*. Todos estos fenómenos son función de la velocidad alta del fluido, por lo que todos pueden evitarse controlando la velocidad del fluido al pasar y salir de los internos. Lo único que no puede evitarse es el *flashing* porque las condiciones del proceso no lo permiten, pero regulando la velocidad del líquido a través de la válvula se modera el efecto destructivo de este fenómeno.

Por lo tanto cuando se detecte que la presión de entrada es igual al doble o más de la presión de salida de la válvula, se sabe que se trata de una aplicación de servicio severo o crítico o riguroso o riesgoso pues la energía potencial de la diferencia de presiones puede convertirse en energía cinética dentro y a la salida de los internos de la válvula que es donde la velocidad sería la mayor, entonces se deberá especificar cuidadosamente la requisición de una válvula, pues de no hacerlo el ingeniero se arriesga a seleccionar un equipo deficiente que podría causar problemas operativos de control y físicos, costos enormes operativos y de mantenimiento y en algunas ocasiones riesgos, sobre todo cuando se manejan combustibles.

### **1.3.5 Características de caudal inherente**

Es la relación que existe entre el coeficiente de flujo o  $C_v$  (tasa de flujo a través de una válvula bajo ciertas condiciones) y la posición del elemento de cierre. La existencia de más de una característica de caudal plantea el problema de la selección de la adecuada que satisfaga las características del proceso. Este punto no está suficientemente definido y es motivo de discusión constante principalmente porque muchas veces se desconocen ciertos datos de la dinámica del proceso.

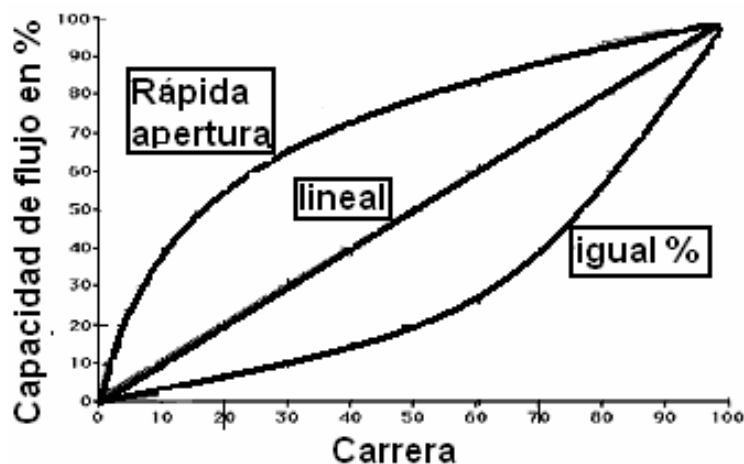
Idealmente la característica de la válvula debe ser tal que el bucle de control tenga la misma estabilidad para todas las variaciones de carga del proceso.

Se tienen las siguientes opciones:

- a) **Característica isoporcentual (= %):** es una característica de flujo en la cual, para cada incremento de carrera del obturador (*travel*) se produce un cambio en el caudal que es proporcional al caudal que fluía antes de la variación.
- b) **Característica lineal:** una característica de flujo que puede ser representada por una línea recta sobre la gráfica Caudal vrs. carrera del elemento de cierre u obturador.
- c) **Característica de rápida apertura (*quick opening*):** característica de caudal en la cual un máximo coeficiente de flujo es alcanzado con un recorrido mínimo del elemento de cierre.

Las curvas que resultarían al graficar cada una de las características anteriores se muestran en la figura 21

**Figura 21. Características de caudal inherente de las válvulas de control**



### **1.3.6 Tipos de acciones de las válvulas de control**

Según su acción los cuerpos de las válvulas se dividen en válvulas de acción directa cuando el obturador tiene que bajar para cerrar, e inversa cuando tiene que subir para cerrar. Esta misma división se aplica a los actuadores que son de acción directa cuando aplicando aire, el vástago se mueve hacia abajo, e inversa cuando al aplicar aire el vástago se mueve hacia arriba.

Al combinar estas acciones se considera siempre la posición de la válvula sin aire sobre su diafragma, con el resorte manteniendo el diafragma y por tanto la válvula en una de sus posiciones extremas.

Cuando la válvula se cierra al aplicar aire sobre el diafragma o se abre cuando se quita el aire debido a la acción del resorte, se dice que la válvula sin aire abre, aire para cerrar, normalmente abierta o de acción directa.

Al abrir la válvula cuando se aplica aire sobre el diafragma y se cierra por la acción del resorte cuando se quita el aire, se dice que la válvula sin aire cierra, aire para abrir, normalmente cerrada o de acción inversa.

Esto es muy importante desde el punto de vista de seguridad. Ninguna instalación esta exenta de averías y una de ellas puede ser un fallo de aire o de corriente de alimentación con lo cual la válvula pasa a una de sus posiciones extremas y esta debe ser la más segura para el proceso, definitivamente quien determina esto es el ingeniero de planta quien deberá tomarlo en cuenta al momento de seleccionar la válvula.

### **1.3.7 Dimensionamiento de las válvulas**

Una válvula seleccionada con una caída de presión muy alta puede causar erosión de discos y daños en los sellos de la válvula. Además, la cavitación puede causar ruidos extremos, daño a las partes internas de la válvula y posiblemente al cuerpo.

Todos los fabricantes entregan con la válvula una tabla que indica las máximas presiones diferenciales recomendadas para la válvula y es importante no excederlas.

El problema de cavitación, que analizaremos en la siguiente sección, se da en el manejo de líquidos a temperaturas cercanas a su punto de saturación para evitarlo es muy importante saber dimensionar la válvula.

Sistemas donde la cavitación es amenazante pueden ser rediseñados para proveer velocidades de entrada más bajas, si esto no es posible los internos de la válvula deben ser seleccionados de manera que presenten cierta dureza.

La necesidad universal de normalizar el cálculo de las dimensiones de las válvulas, no sólo en cuanto a tamaño sino también en cuanto a capacidad de paso del fluido, ha llevado a los fabricantes y a los usuarios a adoptar un coeficiente que refleja y representa la capacidad de las válvulas de control.

El primer coeficiente de dimensionamiento que se utilizó fue el denominado  $C_v$  que empleado inicialmente en Estados Unidos, se define como “Caudal de agua en galones USA por minuto que pasa a través de la válvula en posición completamente abierta y con una pérdida de presión de una libra por pulgada cuadrada”.

En el sistema métrico se utiliza el coeficiente  $k_v$  que la norma internacional IEC-534-1987 sobre Válvulas de Control de Procesos Industriales define como: “Caudal de agua (de 5 a 40 °C) en  $m^3/h$  que pasa a través de la válvula a una apertura dada y con una pérdida de carga de 1 Bar” y se calcula según la fórmula:

$$k_v = \dot{Q} \sqrt{\frac{SG}{\Delta P}}$$

Donde:

Fluido = agua

$k_v$  = Coeficiente de flujo en  $m^3/h$  cuando  $\Delta P = 1$  Bar

$Q = m^3/h$

$\Delta P$  = Diferencial de presión, en Bar, entre la entrada y la salida de la válvula

El coeficiente de la válvula depende del área de paso y de la resistencia al paso del fluido, es decir, de la configuración hidráulica, del estado de las superficies interiores, del tipo de válvula, etc.



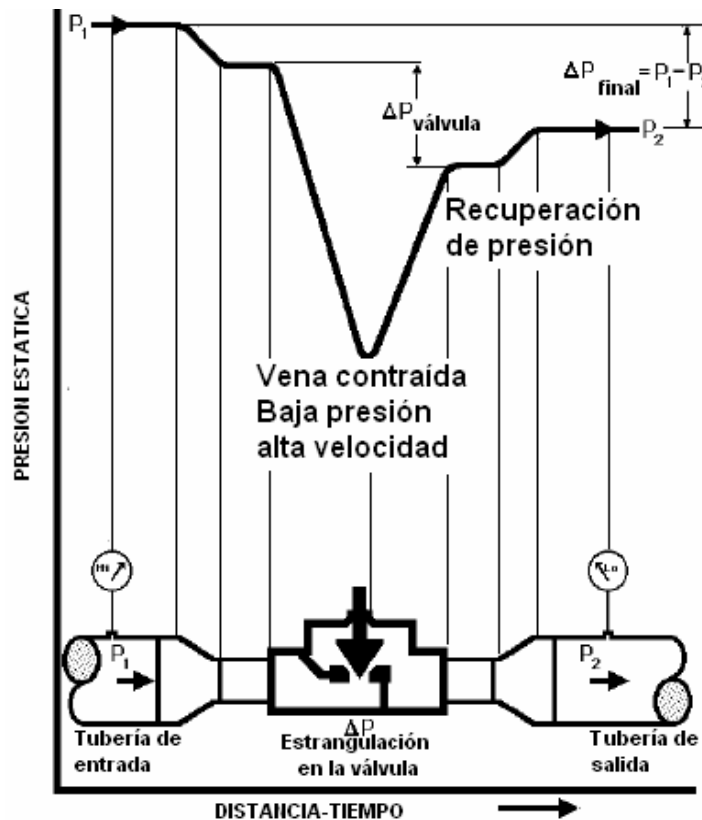
El fabricante publica en sus catálogos el coeficiente para cada válvula y luego que hemos calculado el que nosotros requerimos según las condiciones de nuestro proceso podemos hacer la selección de la válvula aplicando un factor de seguridad conveniente. Esto significa que la válvula no necesariamente tendrá el mismo diámetro que la tubería donde será instalada, y en la mayoría de los casos será menor.

### **1.3.8 Cavitación en válvulas**

En la estrangulación de la vena del líquido, llamada zona de vena contraída, el fluido alcanza su máxima velocidad y su mínima presión. Si en esta zona, la velocidad es suficiente, la tensión de vapor del líquido llega a ser inferior a la presión del vapor saturado, formando pues burbujas de vapor que colapsan (implosión) si a la salida de la válvula la presión es superior a la presión de saturación del líquido. Este fenómeno de formación continua de burbujas de vapor y su desaparición a la salida de la válvula recibe el nombre de cavitación. El intercambio continuo entre la presión y la velocidad del líquido a lo largo de su recorrido a través de la válvula se denomina “recuperación de presión” y juega un papel importante en la determinación precisa del tamaño de la válvula cuando trabaja en estas condiciones.

La cavitación se inicia a presiones estáticas algo superiores a la tensión de vapor del líquido. Las cavidades que nacen dentro del líquido y que colapsan súbitamente limitan la capacidad de la válvula a partir de un determinado caudal crítico y pueden generar ruidos y vibraciones excesivos con el peligro de causar daños mecánicos graves provocados por el impacto de las burbujas de vapor en implosión con alguna parte sólida de la válvula o de la tubería incluso; la energía liberada por las burbujas es lo suficientemente grande como para destruir el material o la superficie de protección en poco tiempo. La cavitación debe pues evitarse y desaparece cuando la presión en la vena contraída es superior a la tensión de vapor. En la figura 22 puede verse la caída de presión que sufre el fluido al atravesar la válvula y la formación de la vena contraída.

**Figura 22. Caída de presión a través de la válvula**



## 1.4 Tipos de Control

En los inicios de la era industrial, el control de los procesos se llevó a cabo mediante tanteos basados en la intuición y en la experiencia acumulada. Un caso típico fue el control de acabado de un producto en el horno. El operario era realmente el instrumento de control que juzgaba la marcha del proceso por el color de la llama, por el tipo de humo, el tiempo transcurrido y el aspecto del producto y decidía así el momento de retirar la pieza; en esta decisión influía muchas veces la suerte, de tal modo que no siempre la pieza se retiraba en las mejores condiciones de fabricación. Más tarde, el mercado exigió mayor calidad en las piezas fabricadas lo que condujo al desarrollo de teorías para explicar el funcionamiento del proceso, de las que derivaron estudios analíticos que a su vez permitieron realizar el control de la mayor parte de las variables de interés en los procesos.

Industrias de proceso proveen tipos innumerables de bienes y servicios. Tal como los tipos de bienes y servicios varían, los métodos de control usados en la producción varían. Algunos procesos requieren un control muy pequeño, es decir que ellos pueden operar satisfactoriamente con un amplio rango de tolerancia. Otros pueden requerir un mejor control. Un proceso específico determinaría el tipo de control requerido. El componente en el lazo que provee un control de proceso automático es el controlador.

Un lazo de control está diseñado para responder a un *upset* en el proceso. Los *upsets* son condiciones externas que cambian la demanda colocada en el sistema de control y causan cambios en las variables de proceso. El controlador toma decisiones que afectan las variables en el proceso, así que el rol del controlador es crítico.

Los aparatos en un típico proceso de lazo incluyen un sensor, un transmisor, un controlador y un elemento de control final. El sensor mide el valor de la variable controlada. Este valor es convertido en una señal estándar por medio de un transmisor. El transmisor envía la señal al controlador. El controlador compara la señal a un *set point* y basado en cualquier desviación, decide si alguna acción es requerida. La señal de salida del controlador posiciona el elemento de control final. El elemento de control final responde a la señal de salida cambiando el valor de la variable manipulada. La variable manipulada, afecta el valor de la variable controlada, el cual es de nuevo detectado por el sensor. Esta acción continúa hasta que el valor de la variable controlada se une al *set point*.

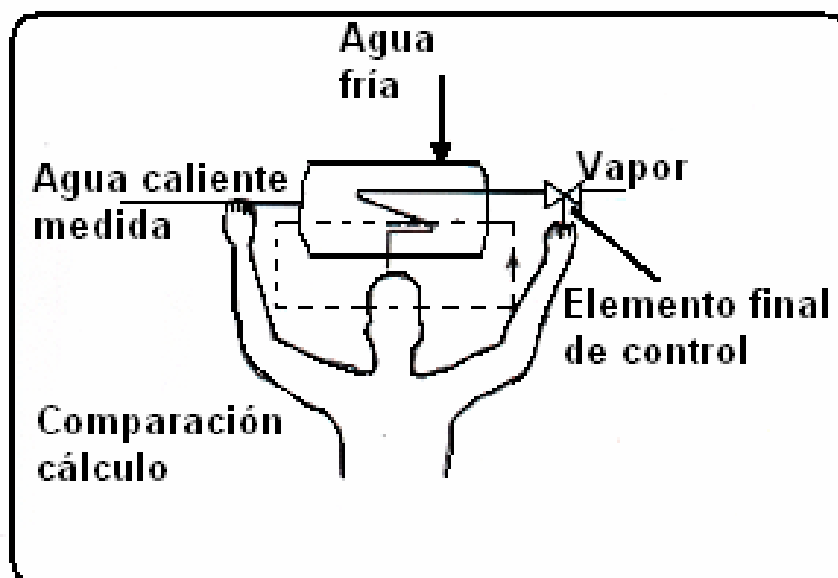
Las acciones de algoritmos entre el controlador son combinados para producir la acción de control deseada. Estos algoritmos son usualmente referidos como modos de control.

Veamos los principales modos de control empezando con el control manual que nos servirá de base para el estudio del control automático de procesos.

### 1.4.1 Control manual

La figura 23 representa el control manual de un intercambiador de calor. El operario nota la temperatura de salida del agua con la mano y acciona la válvula de vapor para mantener agua a la temperatura deseada (*set point*). Supongamos que en estas condiciones, existiendo una temperatura constante en la salida, hay un aumento en el caudal de agua de entrada. Como la válvula de vapor sigue estando en la misma posición, el intercambiador no llegará a calentar el mayor caudal del agua fría de entrada, por lo cual, la temperatura de salida deberá disminuir. Ahora bien, debido a la inercia del proceso, pasará cierto tiempo hasta que el agua más fría alcance la mano izquierda del operario. Cuando éste nota la disminución de la temperatura, debe compararla con la temperatura que desea y calcular mentalmente y según su conocimiento del proceso cuántas vueltas debe dar la válvula de vapor y en que sentido, y a continuación realizar esta corrección manual en la misma. Se necesita cierto tiempo para llevar a cabo estas decisiones y corregir la posición de la válvula.

Figura 23. Control manual

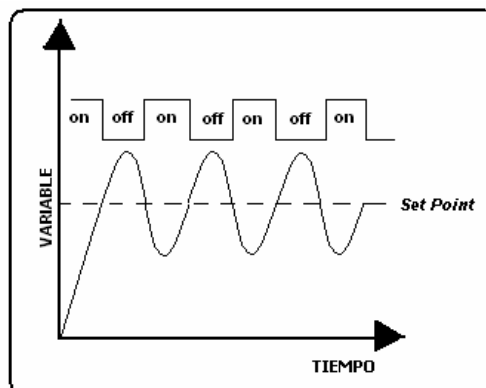


Pasa cierto tiempo para que los efectos de corrección de la válvula se noten en la temperatura de salida y puedan ser captados por el operador. Hasta ese momento el operador será capaz de determinar si la acción que realizó fue correcta y suficiente, de lo contrario deberá realizar una segunda corrección y así sucesivamente.

#### 1.4.2 Control todo nada (*on –off*)

En este tipo de control el elemento final de control se mueve rápidamente entre dos posiciones extremas dependiendo si la señal de error es positiva o negativa. Para prevenir que la salida oscile desmesuradamente el controlador no cambia a la posición máxima o mínima precisamente en el mismo punto que el valor deseado sino que existe un pequeño diferencial conocido como histéresis. Para el control de temperatura, por ejemplo, un valor típico de histéresis en el control todo nada es  $1^{\circ}\text{C}$ , es decir si el valor deseado es  $90^{\circ}\text{C}$  la válvula que permite el paso del vapor se abrirá cuando la temperatura caiga a  $89^{\circ}\text{C}$  y se volverá a cerrar cuando la temperatura alcance los  $91^{\circ}\text{C}$ . Obviamente este no es un control muy preciso pero se puede utilizar precisamente cuando el proceso permite cierta desviación. En la figura 24 se grafica el comportamiento del control todo-nada.

**Figura 24. Control todo nada**



### **1.4.3 Control flotante**

El control flotante, denominado realmente control flotante de velocidad constante mueve el elemento final de control a una velocidad única independiente de la desviación. Por ejemplo, el control todo nada puede convertirse en una regulación flotante si se utiliza una válvula motorizada reversible de baja velocidad con un tiempo de recorrido de 1 minuto, o más desde la posición abierta a la cerrada o viceversa. Su principal ventaja es que puede compensar los cambios de carga lentos del proceso desplazando gradualmente la posición de la válvula. Sin embargo, no es adecuado si hay un retardo importante o si los cambios de carga, aunque sean pequeños, son muy rápidos.

### **1.4.4 Control proporcional de tiempo variable**

En este control existe una relación predeterminada entre el valor de la variable controlada y la posición media en tiempo del elemento final de control de dos posiciones. Esto es, la relación del tiempo de conexión al de desconexión final es proporcional al valor de la variable controlada. La longitud de un ciclo completo (tiempo abierta mas tiempo cerrada) es constante pero la relación entre los tiempos de conexión a desconexión (apertura a cierre) dentro de cada ciclo varían al desviarse la variable controlada del punto de consigna o *set point*.

### **1.4.5 Control PID**

La mayoría de procesos industriales, tales como la extrusión de plásticos, tratamientos de metales o fabricación de semiconductores, requieren un control estricto y riguroso. Para lograr ello, se emplea un algoritmo de control avanzado denominado PID.

El control PID es referenciado generalmente como control de “tres términos”.

Los términos son:

P término proporcional

I término integral

D término derivativo

La salida del controlador es la suma de los tres términos arriba mencionados. La salida combinada es función de la magnitud de la señal y de la duración del error, y del rango de cambio de la variable de proceso.

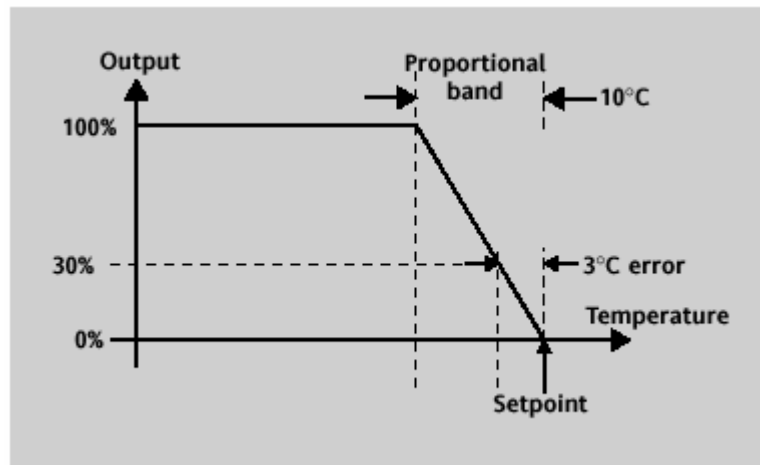
#### **1.4.5.1 Acción proporcional**

El término proporcional entrega una señal que es proporcional a la magnitud de la señal de error.

El rango sobre el cual la salida es ajustada de 0 a 100% se denomina “banda Proporcional”. Y se expresa en porcentaje del *span* del rango de ingeniería. En el ejemplo de la figura 25 la banda proporcional es 10°C y el error de 3 ° C producirá una salida del 30%.



**Figura 25. Acción proporcional**



Los controles del tipo “P” por sí solos, generalmente no son capaces de controlar con precisión al “*set point*” sino con un “*offset*” correspondiente en el cual la salida iguala a las pérdidas del sistema.

#### **1.4.5.2 Acción integral**

El control integral remueve los estados de permanencia en “*offset*” por medio de hacer que la salida se dispare hacia arriba o hacia abajo en proporción a la amplitud y duración de la señal de error. El factor de incremento de la rampa (constante de tiempo integral) debe tener mayor duración que la constante de tiempo del proceso para evitar oscilaciones.

El tiempo de acción integral es el tiempo en el cual la señal de salida, debido a la acción integral, aumenta en una proporción igual a la porción de la salida ocasionada por la acción proporcional cuando una desviación constante se hace presente.

### 1.4.5.3 Acción derivativa

El término derivativo es proporcional al rango de cambio de la señal de la variable de proceso. Este es empleado para prevenir “disparos” por encima o por debajo con respecto del “*set point*” si existe un cambio repentino en la demanda, tal es el caso como cuando se abre la puerta de un horno.

En presencia de cambios, a un régimen constante, de la variable de proceso, la acción derivativa produce un cambio en la señal de salida proporcional al régimen de cambio.

La constante de tiempo derivativa, es el intervalo de tiempo en el cual la parte de la señal de salida ocasionada por la acción proporcional incrementa en una cantidad igual a la parte de la señal de salida debida a la acción derivativa.

Podríamos definir cada una de las acciones del control PID con los siguientes enunciados:

**PROPORCIONAL:** Se encarga de la magnitud del error.

**INTEGRAL:** Trabaja en función del tiempo que dura el error.

**DERIVATIVO:** Se anticipa a las variaciones del error.

En la mayoría de procesos actuales se utiliza el control PID con diversas variantes.

## **2 FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS DEL VAPOR**

### **2.1 Qué es el vapor**

Como muchas otras sustancias, el agua puede existir en estado sólido líquido o gaseoso. Nos enfocaremos en las fases líquida y gaseosa y los cambios que ocurren durante la transición entre estas dos fases. El vapor es el estado vaporizado o gaseoso del agua el cual contiene energía calorífica que generalmente es transferida a una gran variedad de procesos desde calentamiento del aire hasta líquidos que vaporizan en los procesos de refinamiento.

#### **2.1.1 BTU**

La unidad básica de medición para todos los tipos de energía calorífica es la Unidad Térmica Británica o BTU (por sus siglas en inglés). Específicamente es la cantidad de calor necesaria para elevar una libra de agua un grado Fahrenheit.

#### **2.1.2 Temperatura**

Un grado de caliente o frío medido sobre una escala definida. Para todos los propósitos prácticos la escala es una medición desde un punto de inicio conocido hasta un extremo también conocido, por ejemplo los puntos de solidificación y vaporización del agua a una presión fija.

### **2.1.3 Calor**

Es una forma de energía.

### **2.1.4 Saturación**

Es el punto donde una sustancia no puede sostener más energía sin cambiar de fase.

### **2.1.5 Entalpía**

El término dado al total de energía, debido a la presión y temperatura de un fluido o vapor, en cualquier tiempo o condición dada.

### **2.1.6 Presión manométrica**

Es la presión arriba de la presión atmosférica. (Véase sección 5.2)

### **2.1.7 Presión absoluta**

La presión desde y arriba del vacío perfecto. (Véase sección 5.2)

### **2.1.8 Calor sensible**

La entalpía del agua saturada. Esta es la energía calorífica que eleva la temperatura del agua.

### **2.1.9 Calor latente**

Es la entalpía de evaporación o la cantidad de calor que produce un cambio en el estado líquido del agua a gas.

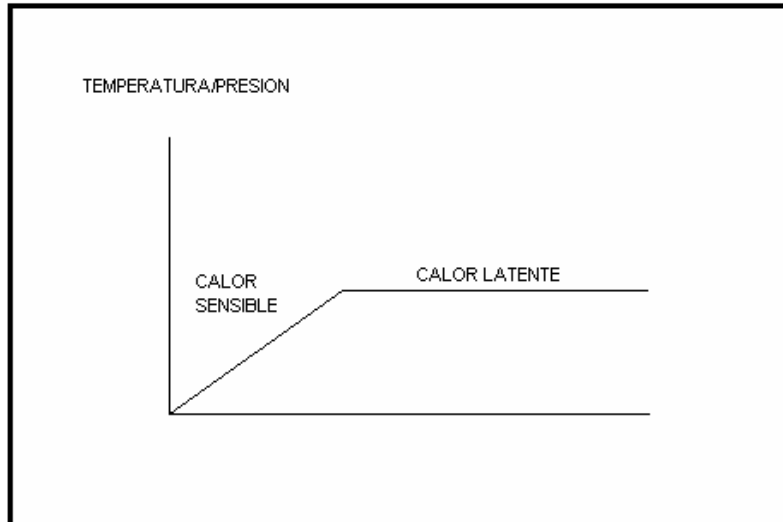
## **2.2 Formación de vapor**

El vapor es creado de la ebullición del agua. Como la energía calorífica es agregada al agua la temperatura del agua se eleva en consecuencia. Cuando el agua alcanza su punto de saturación, esta empieza a cambiar de líquido a gas. Podemos experimentar como sucede esto colocando un termómetro en una libra de agua a una temperatura igual a 32 °F la cual es la temperatura más baja a la que el agua puede existir en la presión atmosférica antes de cambiar de líquido a sólido.

Coloquemos ahora esta agua en una cacerola y apliquemos calor por medio de la llama de una estufa. La energía calorífica proveniente del quemador será transferida al agua, a través de la cacerola, causando que la temperatura de esta se eleve.

Podemos determinar la energía transferida (figura 26) observando la temperatura que indica el termómetro y recordando la definición de un BTU. Cada grado que se elevo la temperatura es registrado en el termómetro y puede considerarse como la adición de un BTU ya que contamos con una libra de agua en la cacerola. Eventualmente, la temperatura del agua se elevará a su punto de ebullición (temperatura de saturación) a la presión atmosférica la cual es 212 °F al nivel del mar. Cualquier calor adicional que agreguemos en este punto causara que el agua empiece a cambiar de estado (fase) desde líquido a gas (vapor).

**Figura 26. Energía de vaporización del agua**



A la presión atmosférica y a nivel del mar hemos agregado 180 BTU cambiando la temperatura del agua de 32 °F a 212 °F ( $212-32 = 180$ ). Esta entalpía es conocida como calor sensible (BTU por libra). Si continuamos agregando calor al agua, notaremos que la indicación del termómetro ya no cambiará, pero el agua comenzará a convertirse en vapor. El calor agregado que causa que el agua cambie de líquido a vapor es conocido como calor latente. Este calor latente contenido es el propósito exclusivo de la generación de vapor. El calor latente tiene un alto contenido de calor que se transfiere rápidamente a los productos o procesos más fríos sin perder temperatura. Conforme el vapor entrega su calor latente este se condensa y regresa a la fase líquida a la misma temperatura que el vapor. La suma de los dos contenidos de calor, sensible y latente, es conocida como calor total.

Sucede una cosa interesante cuando realizamos este ejercicio y es el cambio de volumen que el gas (vapor) ocupa versus el volumen que el agua líquida ocupaba. Una libra de agua a la presión atmosférica ocupa únicamente 0.016 pies cúbicos, pero cuando convertimos esta agua en vapor a la misma presión el vapor ocupa 26.8 pies cúbicos para la misma libra.

El vapor que hemos creado sobre nuestra estufa en casa, proveerá humedad al aire circundante en el espacio y elevará un poco la temperatura de este. El vapor es además un útil transportador de energía a otros tipos de procesos. Con el propósito de hacer que el vapor fluya del punto de generación a otro punto en el que será utilizado, deberá existir una diferencia de presión.

Por lo tanto, nuestra cacerola que funcionó como generador de vapor no creará una fuerza significativa para mover el vapor. Una caldera, para todos los procesos prácticos, es una cacerola con una tapa. Existen muchos tipos de calderas más adelante veremos la clasificación principal. Por ahora nos referiremos a ellas únicamente como calderas. Si contenemos el vapor dentro de una caldera la presión empezará a elevarse con el cambio de volumen de líquido a gas. Conforme la presión se eleva el punto de ebullición del agua interior también se eleva. Si la presión del vapor saturado es conocida la temperatura es también conocida. Consideraremos más adelante esta relación cuando veamos las tablas de vapor.

Otra cosa que sucede cuando el vapor es creado en una caldera es que el gas es comprimido en un volumen más pequeño (pies cúbicos por libra). Esto es debido a que el líquido no comprimible (agua) es ahora un gas comprimible (vapor). Cuanto más alta es la presión más alta es la temperatura, entre más bajo es el contenido de calor latente, más pequeño el volumen que ocupa el vapor. Esto permite que la planta genere vapor en las presiones más altas y distribuir este vapor en tuberías más pequeñas al punto de uso en la planta. Esta presión más alta en la caldera provee la fuerza para que el vapor fluya.

La necesidad de una eficiencia óptima incrementa con la elevación de los costos de combustible. Los sistemas de vapor y condensando deben ser cuidadosamente diseñados y mantenidos para asegurar que el desperdicio de energía se mantenga en un mínimo.

### **2.3 Punto de ebullición**

Como ya señalamos a medida que se incrementa la presión, también se incrementa la temperatura de saturación o punto de ebullición.

La temperatura de saturación es el límite a la cual el agua puede llegar como líquido. Si se agrega más calor comenzará a evaporarse. Esta correlación es fija.



## 2.4 Vapor húmedo

Las propiedades del vapor saturado seco están en las tablas de vapor. A menudo, el vapor contiene gotas de agua en suspensión. Cuando este es el caso se designa como vapor húmedo. El vapor húmedo contiene menos entalpía que el vapor saturado seco, es decir contiene menos calor útil.

Durante un proceso de evaporación, una sustancia existe como una parte líquida y otra de vapor. Esto es, es una mezcla de líquido y vapor saturados. Para analizar esta mezcla de manera apropiada es necesario conocer las proporciones de las fases líquida y de vapor en la mezcla. Esto se obtiene al definir una nueva propiedad llamada calidad ( $x$ ) como la razón entre la masa de vapor y la masa total de la mezcla, es decir:

$$x = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{total}}}$$

donde la masa total es la suma de la masa de vapor más la masa de líquido.

La calidad tiene significado solamente para mezclas saturadas. No tiene significado en las regiones de líquido comprimido o de vapor sobrecalentado. Su valor se encuentra siempre entre 0 y 1. La calidad de un sistema compuesto por líquido saturado es 0 (ó 0%) y la calidad de un sistema compuesto por vapor saturado es 1 (ó 100%). Como se verá en las tablas de vapor las propiedades del líquido saturado son las mismas ya sea que exista sólo o en una mezcla con vapor saturado. Durante el proceso de vaporización sólo cambia la cantidad de líquido saturado no sus propiedades. Lo mismo sucede con el vapor saturado.

Generalmente la cantidad de masa de cada fase suele desconocerse. En consecuencia, es conveniente imaginar que las dos fases están muy bien mezcladas y forman una mezcla homogénea. En ese caso las propiedades de esta mezcla serán las propiedades promedio de la mezcla saturada de líquido-vapor considerada.

## **2.5 Vapor recalentado**

Si se agrega calor después de que el agua ha sido completamente evaporada, aumenta la temperatura del vapor. Este vapor se llama recalentado y se caracteriza por:

- Presiones menores a la presión de saturación a una temperatura dada.
- Temperaturas mayores a las de saturación a una presión dada.
- Entalpías mayores a una presión o temperaturas dadas.

Antes que condense y entregue su entalpía de evaporación, debe ceder calor hasta que su temperatura iguale la temperatura de saturación.

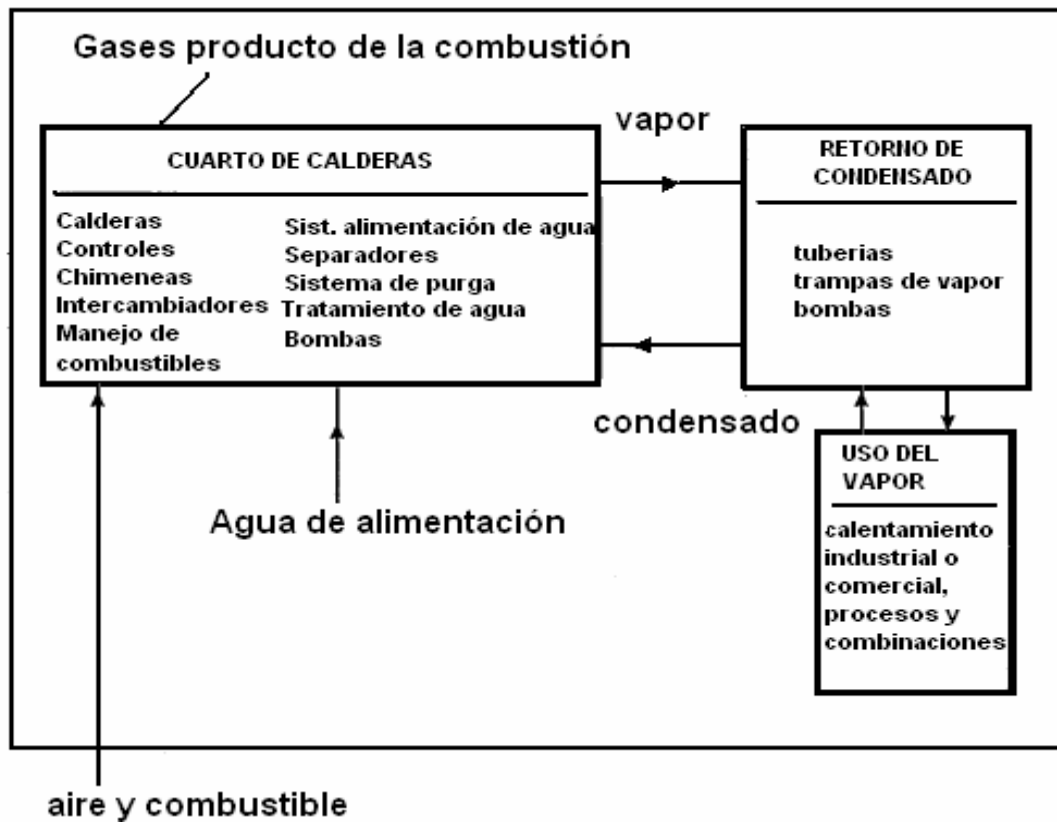
Usualmente el vapor recalentado es la primera opción para generación de potencia.

El vapor saturado es la primera opción para aplicaciones de calentamiento.

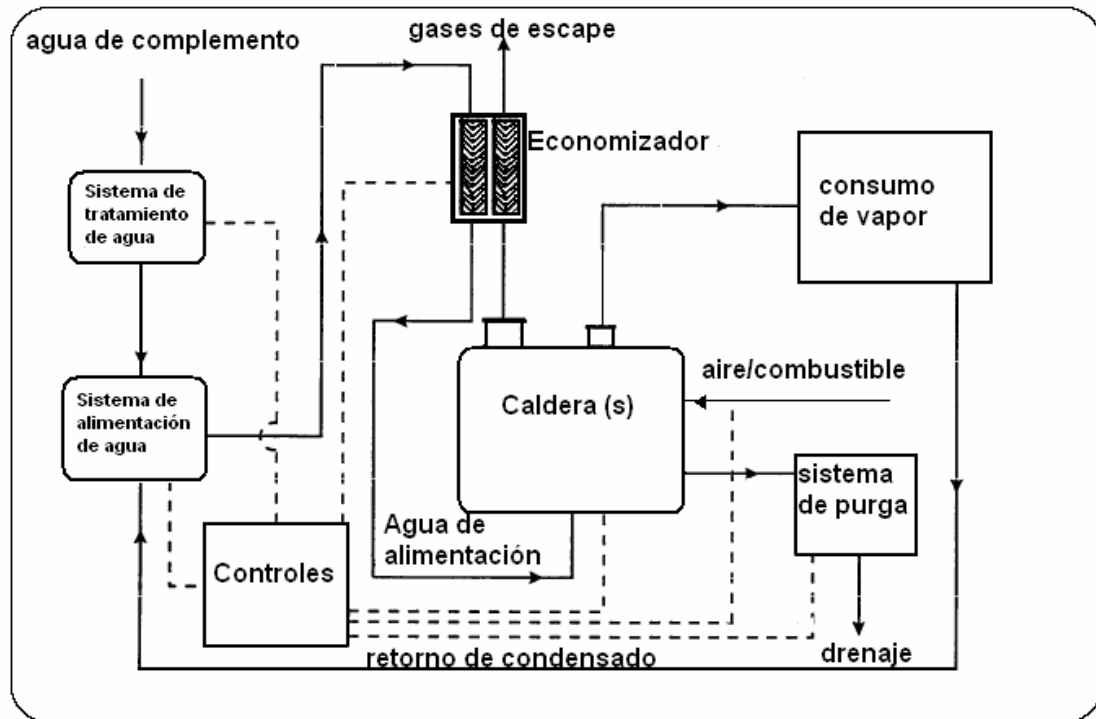
## 2.6 Componentes básicos de una red de vapor

Un sistema de vapor consiste de una instalación para el suministro de vapor, un sistema de tubería para retorno de vapor y condensado y por supuesto un lugar donde se utiliza el vapor. Figuras 27 y 28.

Figura 27. Componentes de una red de vapor



**Figura 28. Diagrama esquemático de una red de vapor**



La instalación para la generación de vapor, localizada en el llamado cuarto de calderas, consiste de calderas, sistemas de agua de alimentación, intercambiadores de calor (Ej. Economizadores), controles automáticos de los sistemas de la caldera, equipo para el manejo de combustible, equipo y tubería para el tratamiento de agua. A su vez, un sistema típico de vapor es diseñado para reunir varias necesidades comerciales e industriales, tales como confort, procesamiento de alimentos, corrugación de papel, etc.

El diseño para la generación de vapor es específico para la aplicación y dictado por una buena práctica de ingeniería y por códigos y normas de distintas asociaciones. El diseño del sistema y la selección dependen de los requerimientos de operación específicos del trabajo, estructura y ventilación del cuarto de calderas, almacenamiento del combustible y otras consideraciones prácticas. Por lo tanto no existe un simple modelo matemático para correlacionar el cuarto de calderas con la aplicación. Sin embargo existen varias características las cuales ayudan a definir la aplicación y sus requerimientos relevantes, estas características incluyen:

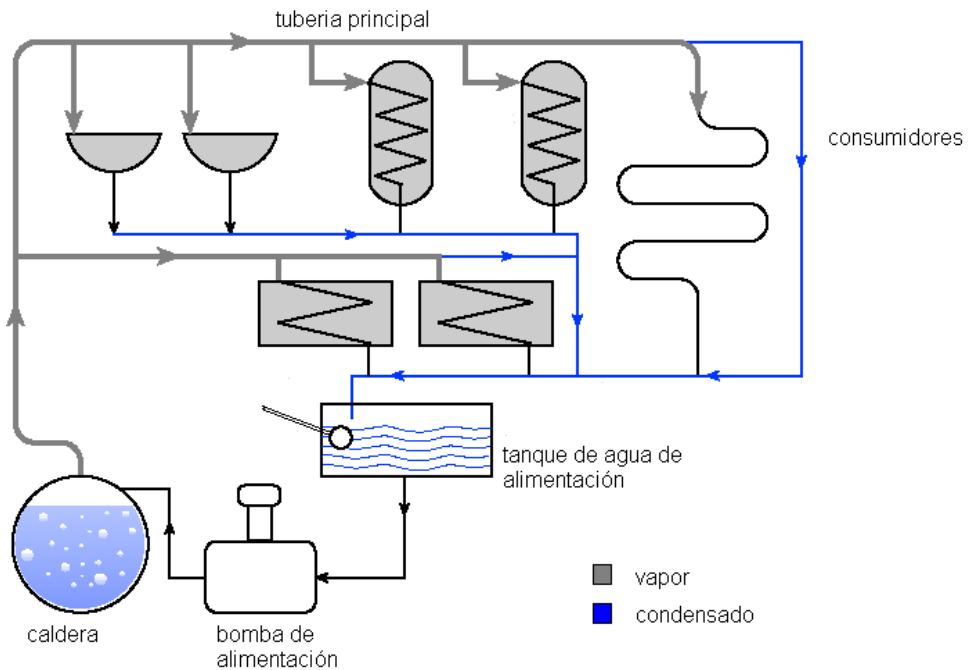
- Tipo de aplicación (carga)
- Condiciones de operación, requerimientos y restricciones
- Requerimientos y restricciones de la planta
- Códigos y normas locales e internacionales

El vapor generado en la caldera debe ser transportado al punto donde su calor es requerido. Inicialmente existirá una o más tuberías principales las cuales conducirán el vapor desde la caldera en dirección al equipo que utiliza el vapor. Ramales más pequeños pueden entonces transportar el vapor a las piezas individuales del equipo.

Cuando la válvula principal de la caldera es abierta, admitiendo vapor en la red de tubería de distribución, inmediatamente empezará el proceso de pérdida de calor. Estas pérdidas de energía se dan con el calentamiento de la tubería a la temperatura del vapor y pérdidas naturales a las condiciones de aire ambientales. El condensado resultante cae al fondo de la tubería y es transportado junto con el flujo de vapor a lo largo de la tubería principal. Este condensado debe ser drenado de la tubería u ocurrirá un daño severo. Cuando las válvulas colocadas en las piezas individuales del equipo demandan vapor el flujo en el equipo intercambiador de calor empieza de nuevo a causar condensación y la caída de presión resultante la cual induce aún más flujo.

La red de vapor debe ser un lazo cerrado y deberá procurarse utilizar nuevamente todo el condensado posible. (Figura 29)

**Figura 29. Manejo del condensado en la red de vapor**



## 2.7 Tablas de vapor

Son tablas donde podemos encontrar propiedades del vapor partiendo de otras propiedades o condiciones conocidas. La tabla II presenta las propiedades del vapor saturado hasta 20 Bar, igualmente existen tablas de propiedades para el vapor sobrecalentado. Su lectura no es muy complicada, por ejemplo si nosotros trabajamos con una caldera que produce vapor saturado a 10 Bar de presión esperaríamos una temperatura de operación aproximada de 184 °C con un volumen específico de vapor de 0.177 m<sup>3</sup>/kg, este último dato es importante cuando queremos considerar el diseño de tubería para la conducción de vapor con el propósito de evitar problemas como ruido debido a las velocidades

**Tabla II. Tablas de vapor saturado**

| PRESIÓN<br>BAR | TEMPERATURA<br>°C | ENTALPIA ESPECÍFICA kJ/kg |             |        | VOLUMEN<br>ESPECÍFICO<br>m3/kg |
|----------------|-------------------|---------------------------|-------------|--------|--------------------------------|
|                |                   | Agua                      | Evaporación | Vapor  |                                |
| 0.3 abs        | 69.1              | 289.23                    | 2336.1      | 2625.3 | 5.229                          |
| 0.5            | 81.33             | 340.49                    | 2305.4      | 2645.9 | 3.24                           |
| 0.75           | 91.78             | 384.39                    | 2278.6      | 2663   | 2.217                          |
| 0.95           | 98.2              | 411.43                    | 2261.8      | 2673.2 | 1.777                          |
| 1              | 99.63             | 417.51                    | 2257.9      | 2675.4 | 1.694                          |
| 1.013          | 100               | 419.06                    | 2257        | 2676   | 1.673                          |
| 0 man          | 100               | 419.06                    | 2257        | 2676   | 1.673                          |
| 0.1            | 102.66            | 430.2                     | 2250.2      | 2680.2 | 1.533                          |
| 0.2            | 105.1             | 440.8                     | 2243.4      | 2684.2 | 1.414                          |
| 0.3            | 107.39            | 450.4                     | 2237.2      | 2687.6 | 1.312                          |
| 0.4            | 109.55            | 459.7                     | 2231.3      | 2691   | 1.225                          |
| 0.5            | 111.61            | 468.3                     | 2225.6      | 2693.9 | 1.149                          |
| 0.6            | 113.56            | 476.4                     | 2220.4      | 2696.8 | 1.088                          |
| 0.7            | 115.4             | 484.1                     | 2215.4      | 2699.5 | 1.024                          |
| 0.8            | 117.14            | 491.6                     | 2210.5      | 2702.1 | 0.971                          |
| 0.9            | 118.8             | 498.9                     | 2205.6      | 2704.5 | 0.923                          |
| 1              | 120.42            | 505.6                     | 2201.1      | 2706.7 | 0.881                          |
| 1.2            | 123.46            | 518.7                     | 2192.8      | 2711.2 | 0.806                          |
| 1.3            | 124.9             | 524.6                     | 2188.7      | 2713.3 | 0.773                          |
| 1.4            | 126.28            | 530.5                     | 2184.8      | 2715.3 | 0.743                          |
| 1.5            | 127.62            | 536.1                     | 2181        | 2717.1 | 0.714                          |
| 1.6            | 128.89            | 541.6                     | 2177.3      | 2718.9 | 0.689                          |
| 1.7            | 130.13            | 547.1                     | 2173.7      | 2720.8 | 0.665                          |
| 1.8            | 131.37            | 552.3                     | 2170.1      | 2722.4 | 0.643                          |
| 1.9            | 132.54            | 557.3                     | 2166.7      | 2724   | 0.622                          |
| 2              | 133.69            | 562.2                     | 2163.3      | 2725.5 | 0.603                          |
| 2.2            | 135.88            | 571.7                     | 2156.9      | 2728.6 | 0.568                          |
| 2.4            | 138.01            | 580.7                     | 2150.7      | 2731.4 | 0.536                          |
| 2.6            | 140               | 589.2                     | 2144.7      | 2733.9 | 0.509                          |
| 2.8            | 141.92            | 597.4                     | 2139        | 2736.4 | 0.483                          |
| 3              | 143.75            | 605.3                     | 2133.4      | 2741   | 0.461                          |
| 3.2            | 145.46            | 612.9                     | 2128.1      | 2742.9 | 0.44                           |
| 3.4            | 147.2             | 620                       | 2122.9      | 2744.9 | 0.422                          |
| 3.6            | 148.84            | 627.1                     | 2117.8      | 2746.9 | 0.405                          |
| 3.8            | 150.44            | 634                       | 2112.9      | 2748.8 | 0.389                          |
| 4              | 151.96            | 640.7                     | 2108.1      | 2753   | 0.374                          |



| <b>Continúa:</b>       |                           |                                  |        |        |   |  |
|------------------------|---------------------------|----------------------------------|--------|--------|---|--|
| <b>PRESIÓN<br/>BAR</b> | <b>TEMPERATURA<br/>°C</b> | <b>ENTALPIA ESPECÌFICA kJ/kg</b> |        |        | <b>VOLUMEN<br/>ESPECÍFICO<br/>m3/kg</b> |  |
| 4.5                    | 155.55                    | 656.3                            | 2096.7 | 2756.9 | 0.342                                   |  |
| 5                      | 158.92                    | 670.9                            | 2086   | 2760.3 | 0.315                                   |  |
| 5.5                    | 162.08                    | 684.6                            | 2075.7 | 2763.5 | 0.292                                   |  |
| 6                      | 165.04                    | 697.5                            | 2066   | 2766.5 | 0.272                                   |  |
| 6.5                    | 167.83                    | 709.7                            | 2056.8 | 2769.1 | 0.255                                   |  |
| 7                      | 170.5                     | 721.4                            | 2047.7 | 2771.7 | 0.24                                    |  |
| 7.5                    | 173.02                    | 732.5                            | 2039.2 | 2774   | 0.227                                   |  |
| 8                      | 175.43                    | 743.1                            | 2030.9 | 2776.2 | 0.215                                   |  |
| 8.5                    | 177.75                    | 753.3                            | 2022.9 | 2778.1 | 0.204                                   |  |
| 9                      | 179.97                    | 763                              | 2015.1 | 2780   | 0.194                                   |  |
| 9.5                    | 182.1                     | 772.5                            | 2007.5 | 2781.7 | 0.185                                   |  |
| 10                     | 184.13                    | 781.6                            | 2000.1 | 2783.3 | 0.177                                   |  |
| 10.5                   | 186.05                    | 790.1                            | 1993   | 2784.8 | 0.171                                   |  |
| 11                     | 188.02                    | 798.8                            | 1986   | 2786.3 | 0.163                                   |  |
| 11.5                   | 189.02                    | 807.1                            | 1979.1 | 2787.6 | 0.157                                   |  |
| 12                     | 191.68                    | 815.1                            | 1972.5 | 2788.8 | 0.151                                   |  |
| 12.5                   | 193.43                    | 822.9                            | 1965.4 | 2790   | 0.148                                   |  |
| 13                     | 195.1                     | 830.4                            | 1959.6 | 2791.1 | 0.141                                   |  |
| 13.5                   | 196.62                    | 837.9                            | 1953.2 | 2792.2 | 0.136                                   |  |
| 14                     | 198.35                    | 845.1                            | 1947.1 | 2793.1 | 0.132                                   |  |
| 14.5                   | 199.92                    | 852.1                            | 1941   | 2794   | 0.128                                   |  |
| 15                     | 201.45                    | 859                              | 1935   | 2794.9 | 0.124                                   |  |
| 15.5                   | 202.92                    | 865.7                            | 1928.8 | 2795.7 | 0.119                                   |  |
| 16                     | 204.38                    | 872.3                            | 1923.4 | 2797.1 | 0.117                                   |  |
| 17                     | 207.17                    | 885                              | 1912.1 | 2798.5 | 0.11                                    |  |
| 18                     | 209.9                     | 897.2                            | 1901.3 | 2799.5 | 0.105                                   |  |
| 19                     | 212.47                    | 909                              | 1890.5 | 2800.5 | 0.1                                     |  |
| 20                     | 214.96                    | 920.3                            | 1880.2 | 2801.4 | 0.099                                   |  |



## **3 CALDERAS DE VAPOR**

### **3.1 Definición**

El término caldera se aplica a un dispositivo para generar vapor para fuerza, procesos industriales o calefacción; o para agua caliente para calefacción o uso general. Por razones de sencillez de comprensión, a la caldera se le considera como un productor de vapor en términos generales. Sin embargo muchas calderas diseñadas para vapor se pueden convertir en calentadores de agua.

Las calderas son diseñadas para transmitir calor de una fuente externa (generalmente combustión de algún combustible), a un fluido contenido dentro de la misma caldera. Si este fluido no es agua ni vapor, por ejemplo mercurio, a la unidad se le clasifica como vaporizador (generador de vapores) o como un calentador de líquidos térmicos.

De cualquier carácter que sea, este líquido debe estar dentro del equipo con las debidas medidas de seguridad. El vapor, o agua caliente, debe ser alimentado en las condiciones deseadas, es decir, de acuerdo con la presión, temperatura y calidad, y en la cantidad que se requiera. Por razones de economía, el vapor debe ser suministrado con un mínimo de pérdidas.

Las calderas y el equipo auxiliar deben ser diseñados y dimensionados para una máxima eficiencia. Los fabricantes de calderas han mejorado el diseño de sus equipos para proveer esta máxima eficiencia, cuando el equipo es nuevo, dimensionado correctamente para las condiciones de carga, y el control de combustión debidamente ajustado. Existen muchas eficiencias cuando se habla de calderas, pero la única medida real de la eficiencia de una caldera es la eficiencia combustible a vapor. Esta eficiencia es calculada utilizando cualquiera de dos métodos, el primer método es salida / entrada, esta es la relación de energía de salida, dividido entre energía de entrada multiplicada por 100. El segundo método es el balance de calor, este método considera temperatura de los gases de escape y pérdidas, exceso de niveles de aire, y pérdidas por radiación y convección. Por lo tanto el cálculo del balance de calor para la eficiencia combustible a vapor es 100 menos el total de pérdidas en la chimenea menos las pérdidas por radiación y convección.

El dimensionamiento de una caldera para una aplicación en particular no es una tarea simple. El uso de vapor varía basado en el porcentaje de la carga de caldera que es utilizado para calentamiento versus proceso y luego la combinación de estas cargas. Estas amplias variaciones de carga son generalmente superadas colocando no sólo una caldera más grande sino posiblemente dos unidades pequeñas o una grande y una pequeña para acomodar las variaciones de carga. Los fabricantes de calderas recomiendan que la relación entre la máxima y la mínima carga no exceda de 4:1, relaciones mayores aumentarán los ciclos de combustión y reducirán la eficiencia.

Una caldera operando en condiciones de carga baja puede cambiar de ciclo (encendido / apagado del quemador) tanto como 12 veces por hora, ó 288 veces por día. Con cada ciclo existe una pre y una postpurga del aire cuyo flujo remueve calor de la caldera desechándolo por la chimenea.

Esta pérdida de energía puede ser eliminada reduciendo la tasa de combustión. Cada vez que la caldera se apaga, debe ir a una secuencia específica de arranque para garantizar la seguridad. Se requiere aproximadamente 1 a dos minutos para colocar de nuevo la caldera en línea. Y si existiera una súbita demanda de carga la secuencia de inicio no puede ser acelerada. Manteniendo la caldera en línea se asegura una respuesta más rápida a los cambios de carga. Además aumentando los ciclos de arranque y paro se acelera el desgaste de los componentes de la caldera, el mantenimiento aumenta y la posibilidad de cambio de piezas por fallo también incrementa.

Una vez las calderas han sido dimensionadas para su salida de vapor, kg/hr entonces la presión de operación han sido determinadas. La presión de operación de la caldera son generalmente determinadas por las necesidades del sistema en cuanto proceso / producto a temperaturas necesitadas y/o la pérdida de presión en la distribución del vapor a través de la planta.

## **3.2 Partes y terminología**

### **3.2.1 Capacidad de una caldera**

La capacidad de una caldera es determinada por la cantidad de vapor (medido en lb/hr, kg/hr, Ton/hr, etc) producidas por la caldera a una presión y temperatura especificada por el fabricante. Por ejemplo 25,000 kg/hr a 7 bar

Un caballo caldera es también una medida de la salida de energía de una caldera y equivale a 15.6 kg/hr.

### **3.2.2 Sistema de control de combustión**

Controladores y dispositivos de campo que proveen la adecuada mezcla de aire y combustible para evaporar segura y económicamente el agua en el domo de la caldera.

### **3.2.3 Condensado**

Líquido restante después de que el vapor es utilizado por el proceso. Generalmente es regresado a la caldera para reutilizarse.

### **3.2.4 Tanque de condensado**

El tanque que recoleta el vapor condensado (agua) proveniente de los procesos.

### **3.2.5 Desareador**

Tanque que calienta el agua de alimentación cerca de su punto de ebullición para remover cualquier oxígeno disuelto en el agua.

### **3.2.6 Demanda**

Cantidad de vapor requerida por la planta.

### **3.2.7 Desmineralizador**

Elemento que remueve los contaminantes no evaporables del agua tales como sales y minerales.

### **3.2.8 Tiro**

Flujo de aire a través de la caldera. Incluye aire para la combustión y gases de escape.

### **3.2.9 Domo**

Área de la caldera donde es producido el vapor o los contaminantes no evaporables son recolectados.

### **3.2.10 Nivel del domo**

Nivel del agua en el interior del domo de vapor la cual esta disponible para evaporación.

### **3.2.11 Control de nivel del domo**

Control que mantiene el nivel del agua en un punto óptimo para la producción de vapor.

### **3.2.12 Combustible dual**

Caldera que utiliza dos tipos de combustible. Una caldera puede ser construida para quemar gas y aceite, aceite y sólidos (tales como madera o bagazo de caña). Uno de los combustibles es utilizado como primario y el otro como un *backup*.

### **3.2.13 Economizador**

Dispositivo que recupera calor de los gases de escape y lo regresa al domo de vapor para aumentar el calor producido por el horno.

### **3.2.14 Eficiencia**

Una medida de que tanto la caldera aprovecha el poder calorífico del combustible para la transformación del agua en vapor, se tendrá mayor eficiencia cuando se tenga una combustión completa dentro del hogar de la caldera. Una combustión incompleta resulta en una eficiencia pobre y mayores costos.

### **3.2.15 Exceso de aire**

Aire no quemado que sale con los gases. Es utilizado para medir la eficiencia de la combustión y también es conocido como exceso de oxígeno o de  $O_2$ .

### **3.2.16 Agua de alimentación**

Agua que está ingresando al domo de vapor y que será convertida en vapor.

### **3.2.17 Sistema de control del quemador**

Secuencia lógica que asegura la operación de la caldera iniciando el paro o previniendo la ignición si se presenta una insuficiencia de aire o exceso de combustible, o si el nivel de agua en el domo es muy bajo.



### **3.2.18 Tiro forzado**

Se puede obtener soplando en el interior de los hogares herméticos debajo de las parrillas y hogares mecánicos o a través de quemadores de carbón pulverizado. El aire se introduce a presión y atraviesa el lecho del combustible o quemador para llegar hasta la cámara de combustión del hogar, tratándose de tiro forzado, la técnica seguida consiste en evacuar los productos de la combustión de la caldera propiamente dicha, por tiro natural, inducido o combinado de los dos.

### **3.2.19 Tiro Inducido**

Consiste en un ventilador de chorro o centrífugo movido por vapor o por electricidad, que está instalado en la base de la chimenea. La aspiración de este ventilador crea un cierto vacío que absorbe los gases de la combustión del ducto de humos y los impele a la chimenea. El ventilador debe ser capaz de absorber grandes volúmenes de gases calientes, razón por la que lleva cojinetes refrigerados por agua.

### **3.2.20 Combustible**

Sustancia utilizada para encender la caldera. Puede ser aceite, bunker, gas, bagazo de caña, madera, etc.

### **3.2.21 Relación aire combustible**

Es la proporción de combustible a aire durante el proceso de combustión.

### **3.2.22 Control de relación aire combustible**

Control que mantiene la relación correcta de aire y combustible para la combustión completa del segundo y prevención de condiciones de relaciones muy ricas en el mismo.

### **3.2.23 Hogar**

Área de la caldera donde son producidos los gases calientes efecto de la combustión.

### **3.2.24 Suavizador**

Dispositivo que remueve lo sólidos no evaporables del agua que será enviada a la caldera.

### **3.2.25 Chimenea**

Sección de la caldera a través de la cual salen los gases de escape hacía la atmósfera.

### **3.2.26 Purga**

Proceso de remover los contaminantes no evaporables en el interior de la caldera. Estos son los contaminantes que no fueron removidos por el suavizador si lo hubiera.

### **3.3 Tipos de calderas**

Las calderas se clasifican basándose en algunas de las características siguientes: (1) uso, (2) presión, (3) materiales de que están construidas, (4) tamaño, (5) contenido de los tubos, (6) forma y posición de los tubos, (7) fuente de calor, (8) clase de combustible, (9) fluido utilizado, (10) sistema de circulación, entre otras.

Debido a que el propósito de este capítulo es dar únicamente una introducción a las calderas para una mejor comprensión del trabajo, veremos la clasificación más general que se refiere al tipo de calderas según el contenido de los tubos.

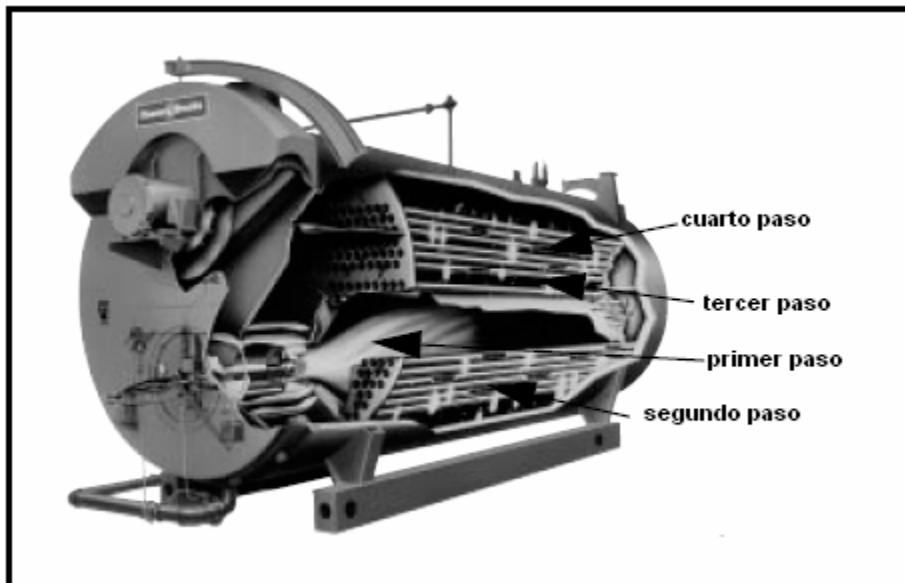
#### **3.3.1 Calderas pirotubulares**

En estas calderas, los gases de combustión son obligados a pasar por el interior de unos tubos, que se encuentran sumergidos en la masa de agua. Todo el conjunto, agua y tubo de gases, se encuentra rodeado por una carcaza exterior. Los gases calientes, al circular por los tubos, ceden calor, el cual se transmite a través de los tubos, y posteriormente al agua.

La presión de trabajo normalmente no excede los  $20 \text{ kg/cm}^2$ , ya que a presiones más altas obligaría a espesores de carcaza demasiados grandes. Su producción de vapor máxima se encuentra alrededor de 25 ton/hr.

En el interior de una caldera pirotubular o de **tubos de humo**, los gases viajan por el horno durante el proceso de combustión (primer paso). La tapa trasera impide la salida de los gases en la porción más baja. El gas “rebota” en la tapa y es redirigido a través del segundo paso de tubos. En la tapa frontal existe también una recámara que impide que los gases escapen por la chimenea (hemos supuesto un diseño de cuatro pasos), y vuelven a rebotar siendo dirigidos por el tercer paso de tubos. Los gases calientes viajan hacia la porción superior de la tapa trasera donde son regresados y dirigidos hacia el cuarto paso de tubos. Después, luego de dar la mayoría de la energía del proceso de combustión, los gases son dirigidos hacia la chimenea donde son venteados a la atmósfera. (Figura 30)

**Figura 30. Caldera pirotubular**



### **3.3.1.1 Aplicaciones de calderas pirotubulares**

Las calderas de tubos de fuego están disponibles para bajas o altas presiones de vapor, o para aplicaciones de agua caliente. Las calderas pirotubulares son típicamente usadas para aplicaciones desde 15 a 1500 caballos caldera.

Debido al tamaño del domo de la caldera la caldera pirotubular contiene una gran cantidad de agua, permitiendo responder a cambios de carga con mínimas variaciones en la presión de vapor.

La presión en una caldera de tubos de fuego esta limitada a 25 bar. Para alcanzar presiones más altas, sería necesario utilizar paredes de tubo y carcaza muy gruesos. Por esta razón se prefieren las calderas de tubos de agua para presiones superiores a los 25 bar.

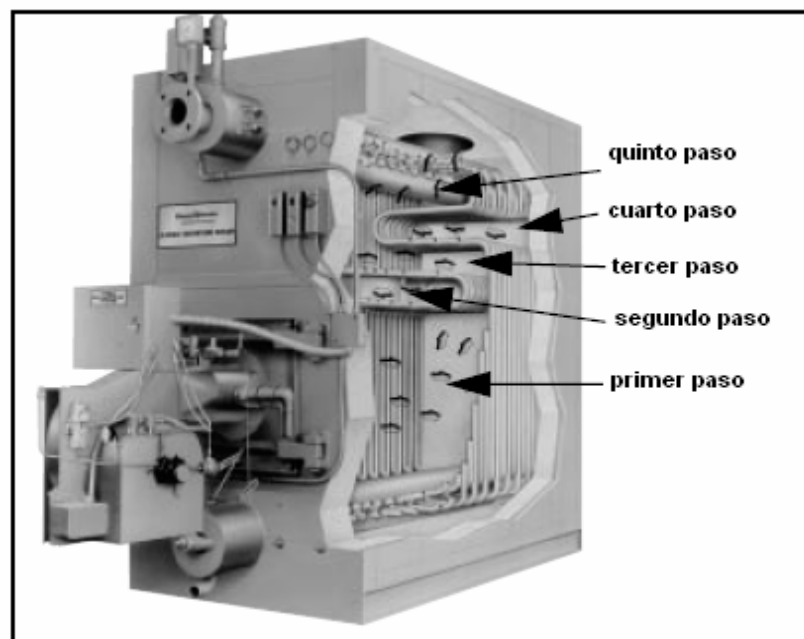
Las calderas pirotubulares encuentran aplicación en las siguientes industrias:

- De alimentos
- Farmacéutica
- Textiles
- Hoteles, hospitales, etc.

### 3.3.2 Calderas acuotubulares

También conocidas como calderas de tubos de agua, utiliza tubos para dirigir el agua de la caldera a través de los gases calientes resultantes del proceso de combustión, permitiendo a los gases calientes transferir su calor por medio de los tubos al agua. El agua fluye por convección de la parte baja a la parte alta.

**Figura 31. Caldera Acuotubular**



Se fabrican en capacidades de 20 HP hasta 2,000 HP. Por su fabricación de tubos de agua es una caldera "INEXPLOSIBLE". La eficiencia térmica está por arriba de cualquier caldera pirotubular, ya que se fabrican de 3, 4 y 5 pasos dependiendo de la capacidad. Los equipos son fabricados con materiales que cumplen con los requerimientos de normas.

### **3.3.2.1 Aplicaciones de las calderas acuotubulares**

Las calderas de tubos de agua generalmente producen vapor o agua caliente principalmente para aplicaciones de procesos industriales, y son utilizadas menos frecuentemente para aplicaciones de calentamiento. En este diseño los tubos contienen vapor y/o agua y los productos de la combustión pasan alrededor de los tubos. Típicamente el diseño consiste de múltiples domos. Un domo de vapor (superior) y un domo de lodos (inferior) los cuales están conectados por medio de tubos los cuales forman la sección de convección y el área del hogar.

En una caldera acuotubular el vapor es generado rápidamente debido a la relativa baja cantidad de agua. Esto permite responder rápidamente a demandas cambiantes de carga.

Algunas aplicaciones pueden requerir vapor sobrecalentado. El vapor sobrecalentado tiene una alta entalpía, y por lo tanto mayor cantidad de energía por libra y mayor calidad (seco). Un ejemplo de la necesidad de vapor sobrecalentado es en una turbina de vapor. Las aspas de una turbina requieren vapor seco ya que la humedad podría destruirlas.

Una caldera acuotubular es capaz de generar vapor saturado o vapor sobrecalentado. Por lo tanto cuando se requiera vapor sobrecalentado, existan grandes o fluctuantes cargas de vapor, o cuando se requieran altas presiones deben considerarse las calderas acuotubulares.

En la Tabla III se resume una comparación entre las calderas piro y acuotubular.

**Tabla III. Aplicaciones de las calderas pirotubular y acuotubular**

|                      | <b>pirotubular</b>       | <b>Acuotubular</b>             |
|----------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Eficiencia           | Alta                     | Media                          |
| Espacio requerido    | Media/alta               | alta                           |
| Mantenimiento        | bajo                     | alto                           |
| Costo inicial        | medio/alto               | alto                           |
| opciones disponibles |                          |                                |
| Rango de presión     | HW/LPS<br>HPS A 350 PSIG | Alta temp HW<br>HPS A 900 PSIG |
| Tamaño típico        | hasta 1500 hp            |                                |
| Aplicaciones         | calentamiento/proceso    | proceso                        |

HW= agua caliente LPS= baja presión de vapor

HPS = Alta presión de vapor



## 4 CONTROLES BÁSICOS DE CALDERAS

La caldera es el equipo que convierte agua en vapor aplicando calor o energía proveniente de la combustión en un quemador. De su correcta elección y equipamiento depende en buena parte el rendimiento total del sistema de vapor.

El vapor proveniente de la caldera debe ser suministrado en la cantidad, presión y temperatura correctas, libre de aire y gases incondensables, limpio y seco.

Los objetivos del equipamiento de la caldera son:

- Funcionamiento
- Seguridad
- Eficiencia

En cuanto a los controles que se colocan para el buen funcionamiento de la caldera podemos mencionar:

- Sistema de control de nivel de agua
- Control de bomba de agua de alimentación
- Control del quemador de combustible
- Presostatos
- Válvulas de interrupción o de corte
- Manómetros

Para la seguridad de la instalación y sus alrededores incluyendo el factor humano tenemos los siguientes controles elementales:

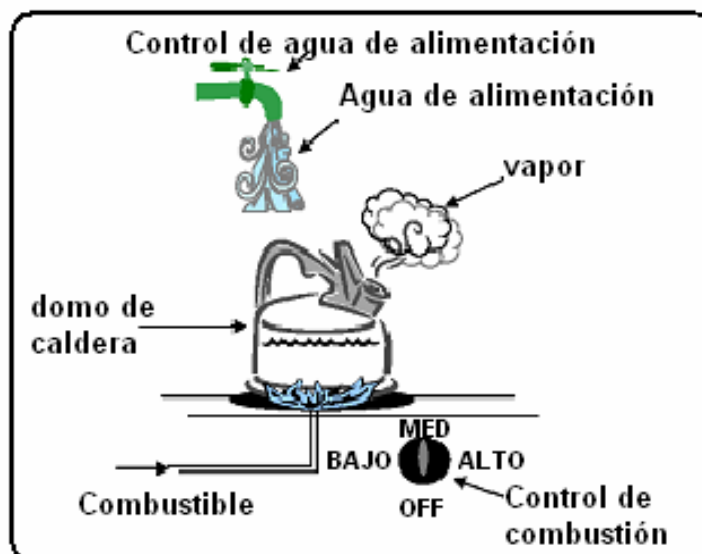
- Indicadores y alarmas de nivel
- Válvulas de seguridad
- Válvulas de retención
- Presostatos
- Normas de construcción, ubicación y operación

Para una mayor eficiencia contamos con:

- Tratamiento del agua de alimentación
- Control de purgas de caldera
- Control de la combustión
- Alimentación de combustible

Consideremos el diagrama de la figura 32.

**Figura 32. Simulación de los controles de una caldera**



Conforme el agua hierve el vapor fluye y el nivel de agua en la olla baja. Si el nivel cae demasiado la olla comenzará a quemarse. Esto es algo indeseable. Tenemos dos elecciones:

Bajar la llama bajo la olla o  
Agregar agua a la olla

Ajustar la llama es el propósito del control de combustión y ajustar el nivel de agua es el propósito del control del nivel del domo algunas veces llamado control del agua de alimentación.

#### **4.1 Control de nivel del domo**

Como ya mencionamos el control de nivel regula la alimentación de agua a la caldera. Para este propósito se tienen diferentes alternativas cuya elección dependerá de la aplicación específica. Entre estas tenemos:

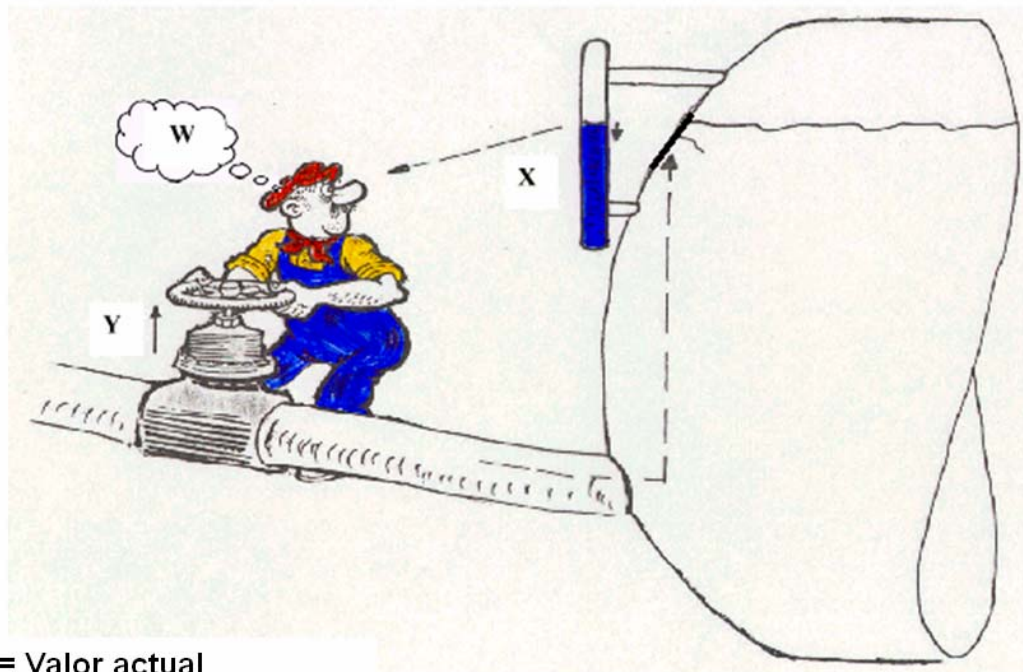
- Control de nivel manual con visor de vidrio
- Control de nivel todo/nada (*on/off*)
- Control de nivel modulante con medición continua del nivel, un controlador y una válvula modulada para la regulación del agua de alimentación

##### **4.1.1 Control de nivel manual**

Es prácticamente obsoleto, pero, nos ayuda a comprender los restantes tipos de control.

En este control el operador conoce el nivel deseado o *set point*, por medio del visor determina la diferencia entre el valor actual y el deseado entonces, por experiencia, calcula la cantidad de vueltas y el sentido en que deberá manipular la válvula de alimentación. (Figura 33).

**Figura 33. Control manual del nivel de agua en la caldera**



X = Valor actual

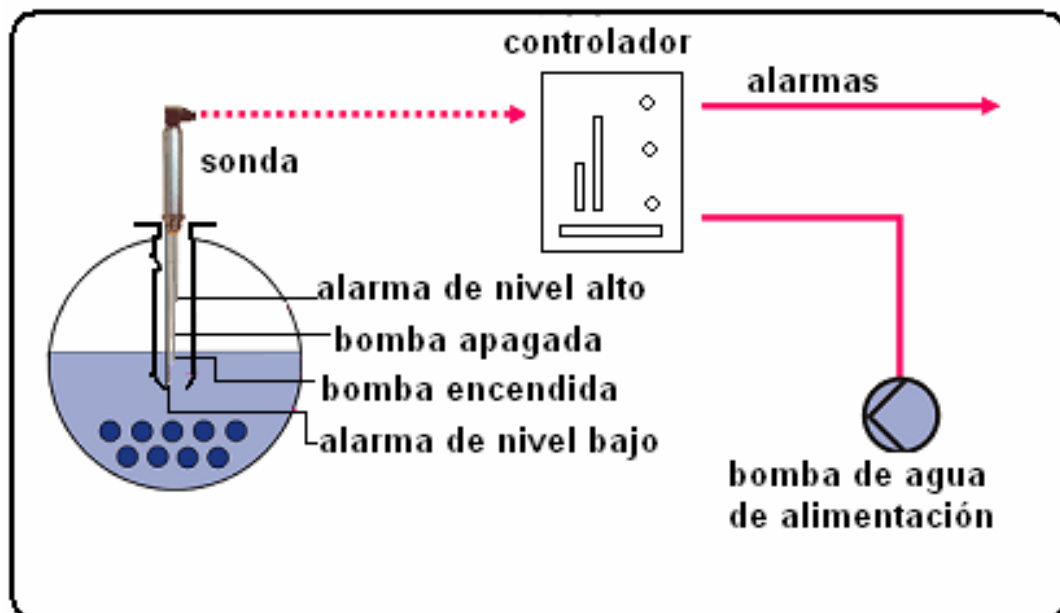
W = Set point

Y = Variable manipulada

#### 4.1.2 Control todo / nada

Más conocido como control *on / off*. Este control actúa sobre la bomba de alimentación en dos niveles de agua preestablecidos. Algunas calderas aún utilizan un sistema de flotador para la determinación de estos niveles, pero en la actualidad la mayoría de calderas que utilizan este tipo de control de nivel hacen uso de sondas de conductividad las cuales comunican al control que debe encender la bomba cuando el nivel de agua en la caldera ha bajado a un mínimo o que debe apagarla cuando el nivel a llegado a un máximo. Generalmente en la sonda se incluyen otros puntos que funcionan como alarmas de alto nivel o de bajo nivel. En el caso de alarma de bajo nivel puede existir una primera que sea visual o sonora y una segunda a un nivel más bajo que interrumpa el quemador o la operación completa. (Figura 34).

Figura 34. Control de nivel todo-nada



### 4.1.3 Control de nivel modulante

El control de nivel modulante actúa sobre una válvula eléctrica o neumática en forma proporcional, para mantener un nivel de agua preestablecido. Variaciones súbitas en el nivel del domo o presión del agua de alimentación reducen grandemente la eficiencia de la caldera y pueden causar costosos paros. Aunque no está involucrado directamente con el control de la combustión, una buena estrategia de control de nivel del domo contribuye a mejorar la eficiencia de la caldera.

El control modulante de nivel del domo puede hacerse utilizando tres métodos diferentes, dependiendo del tamaño de la caldera, la eficiencia deseada por el cliente, y obviamente del capital disponible, aunque debe tenerse en cuenta que cada caso individual debe estudiarse separadamente la tabla IV puede servir como guía:

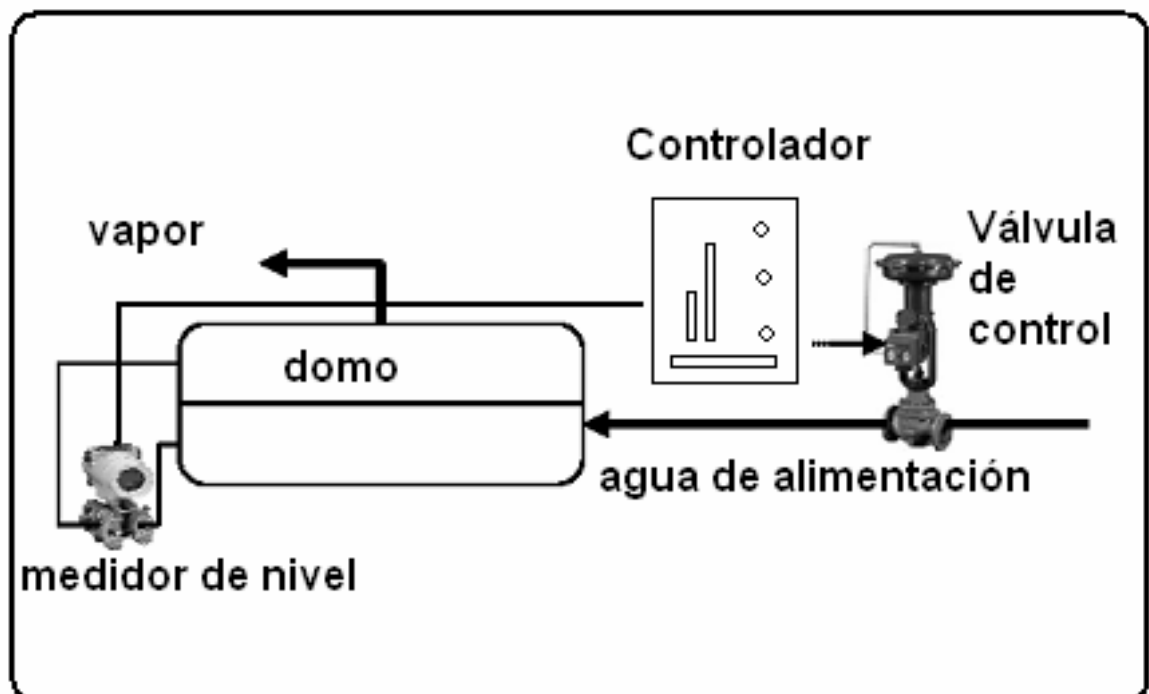
**Tabla IV. Selección de la estrategia de control de nivel modulante según la capacidad de la caldera**

| Tipo           | Variables                                  | Capacidad de la caldera en kg/hr             |                             |                                    |
|----------------|--|--|-----------------------------|------------------------------------|
|                |  | <6000  | 6000-15000                  | >15000                             |
| Un elemento    | nivel                                      | cargas irregulares                           | pequeños cambios de carga   | cargas mantenidas                  |
| Dos elementos  | nivel<br>caudal de vapor                   | cargas irregulares con grandes fluctuaciones | cambios de cargas moderados | lentos cambios de cargas moderados |
| Tres elementos | nivel<br>caudal de vapor<br>caudal de agua |  |                             | >20000                             |

#### 4.1.3.1 Un elemento

En esta estrategia únicamente es medido el nivel. El medidor envía el valor actual del nivel hacia el controlador, este a su vez según el valor deseado que se le ha *seteado* envía la señal hacia la válvula de alimentación de agua para incrementar o disminuir el flujo según se requiera. (Figura 35).

Figura 35. Control de nivel modulante de un elemento



Algunas limitaciones de un sistema de un solo elemento son:

- El nivel no es lineal con el flujo debido a la forma del domo y la no linealidad incrementa con errores de nivel más grandes.
- No hay anticipación de los cambios de carga lo que incrementa el riesgo de errores en la medición del nivel.

- Se asume que la presión del agua de alimentación es constante y que la válvula es lineal con el flujo.
- Es utilizado en pequeñas calderas con cambios de carga lentos.

Una de las ventajas:

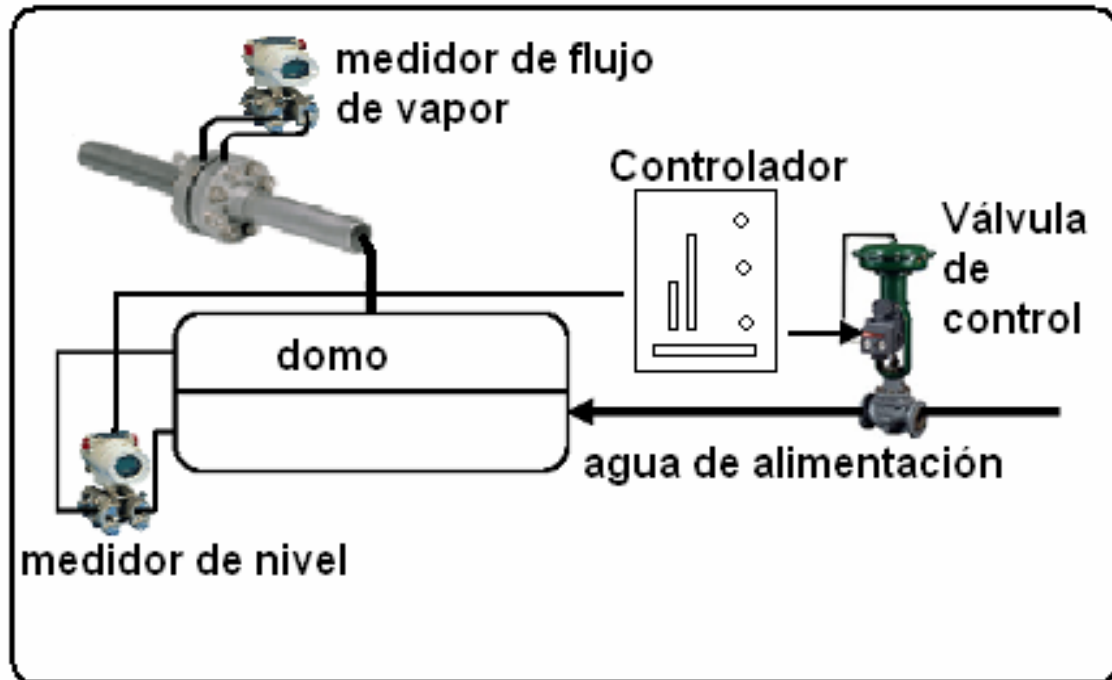
- Bajo costo inicial.

#### **4.1.3.2 Dos elementos**

En esta estrategia es medido además del nivel, el flujo másico de vapor. El medidor de flujo de vapor indica al controlador el cambio en la demanda de vapor y este anticipa el cambio resultante en el nivel. De acuerdo con la demanda de caudal de vapor hay una aportación inmediata de agua de alimentación a través del controlador secundario de nivel. Este último es utilizado solamente como reajuste de las variaciones que pueden producirse con el tiempo en el nivel de la caldera. El controlador compara la señal proveniente del transmisor con el *set point* y modula su salida para corregir el error. (Figura 36).



**Figura 36. Control de nivel modulante de dos elementos**



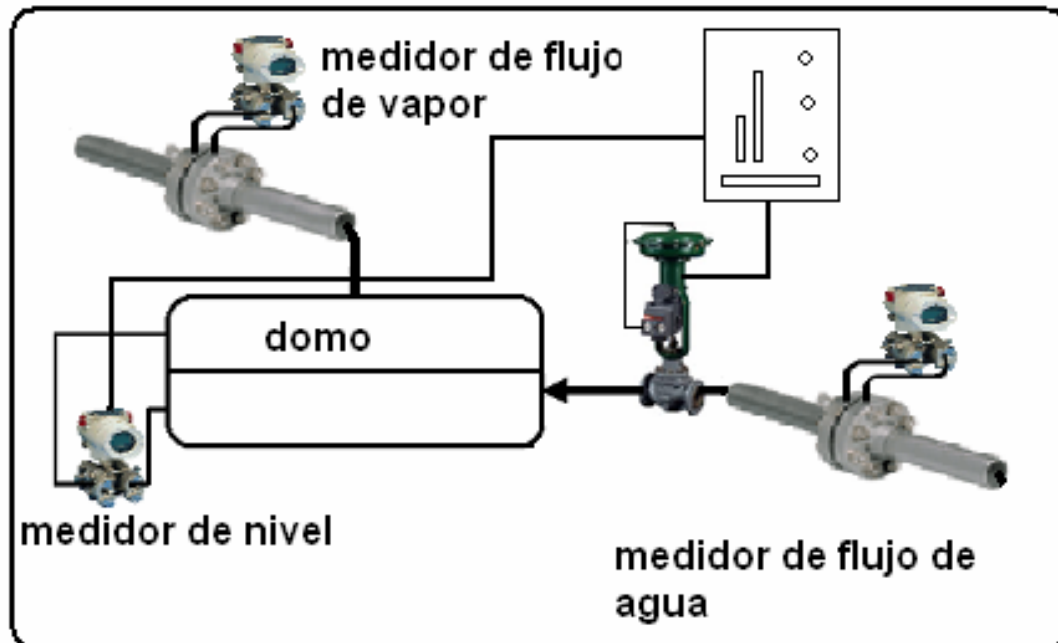
#### **4.1.3.3 Tres elementos**

En esta estrategia son medidos el nivel, el flujo de vapor y el flujo de agua de alimentación de aquí el término tres elementos. Debido a que todas las variables que contribuyen al cambio de nivel están siendo monitoreadas y consideradas por la estrategia de control, esta es la estrategia que provee la mejor respuesta a los cambios de carga. Esto es ideal para calderas con demandas súbitas o impredecibles.

La regulación de tres elementos elimina el fenómeno de oscilación del nivel que se produce cuando el caudal de vapor crece o disminuye rápidamente. Cuando el caudal de vapor aumenta bruscamente, la presión baja, con lo que se produce vaporización rápida que fuerza la producción de burbujas de agua, lo que da lugar al aumento aparente de nivel de la caldera. La oscilación es opuesta a la demanda y el fenómeno es importante en calderas de cierta potencia y volumen reducido, sujetas a variaciones de caudal frecuentes y rápidas.

Para que las condiciones de funcionamiento sean estables, el caudal de vapor y el de agua deben ser iguales y de forma secundaria, el nivel de agua debe reajustarse periódicamente para que se mantenga dentro de unos límites determinados (normalmente son de unos 50 mm por encima y por debajo de la línea central del domo de la caldera). Manteniendo estas funciones en las tres variables, los instrumentos correspondientes pueden estar relacionados entre sí de varias formas. Por ejemplo una señal anticipativa del caudal de vapor, se superpone al control de nivel, y se tiene por objeto dar prioridad a las diferencias entre los caudales de agua y de vapor frente a las variaciones del nivel que pueden producirse ante una demanda súbita, es decir, el sistema de control en estas condiciones actúa obedeciendo a la diferencia relativa de caudales con preferencia a los cambios de nivel. (Figura 37).

**Figura 37. Control de nivel modulante de tres elementos**



Como ya mencionamos la elección de la estrategia de control de nivel depende del tipo de oscilaciones de carga que la caldera experimentará. Cambios lentos de carga con un gran domo pueden ser manejados con un sólo elemento, pero típicamente son recomendados al menos dos elementos de control ya que esto ayuda a proteger contra el burbujeo (*swell*) y contracción (*shrink*) dentro de la caldera que son efectos del rápido cambio de la tasa de calentamiento. Cuando hay un incremento en la carga la presión disminuye y se produce un burbujeo que da un valor falso del nivel de agua y si hay una disminución de la carga la presión se eleva y las burbujas de vapor se contraen dando también un valor falso del nivel el cual se expande cuando la presión es restaurada. Si la presión del agua de alimentación varía, es recomendable contar con tres elementos de control para mantener la linealidad sobre la válvula de alimentación.

#### **4.1.4 Ventajas del control modulante sobre el control todo / nada**

Independientemente de la cantidad de elementos que se utilicen el control modulante tiene varias ventajas sobre el control todo/nada. Entre estas podemos mencionar:

- Presión y caudal de vapor estable
- Mayor eficiencia en la operación del quemador
- Menor fatiga térmica sobre la pared de la caldera. El agua no se puede alimentar a más de 90 °C porque puede darse cavitación en las bombas, esto implica que en el control todo/nada se producen choques térmicos en la caldera que estaría trabajando a una temperatura más alta que el agua proveniente de la bomba.
- Menor arrastre de agua con el vapor
- Puede utilizarse una estación central de bombeo.

#### **4.1.5 Tipos de alarmas**

La mayoría de los controladores comerciales poseen alarmas. Estas se usan para alertar al operador cuando uno de los parámetros excede alguno de los límites establecidos. La alarma puede consistir en una indicación visual (luz intermitente), una señal audible (bocina) o, con frecuencia, ambas. Una alarma puede activar tanto un relé o una válvula, como un motor o una bomba, a fin de interrumpir el funcionamiento de una parte del proceso.

Es posible asignar prioridades a las alarmas, pudiendo ir de alarmas que se disparen por un determinado acontecimiento o por una emergencia. Dependiendo de la prioridad correspondiente, esas alarmas se emplean para el control de calidad, evitar fallas o actuar ante ciertas condiciones críticas que requieran una acción inmediata por parte del operador.

Ciertos controladores presentan numerosos tipos de alarmas. Los más comunes son las alarmas absolutas BAJA Y ALTA.

Se genera una alarma absoluta BAJA cuando el parámetro controlado es inferior al umbral de la alarma.

Se genera una alarma absoluta ALTA cuando el parámetro controlado es superior al umbral de la alarma.

Después de detectar una condición de alarma, se debe seguir un protocolo de reconocimiento. Este depende de la acción de la alarma seleccionada. Dicha acción puede ser de tipo con cerrojo o sin cerrojo.

Cuando la alarma es accionada sin cerrojo, ésta requiere que el operador la reconozca. Este reconocimiento no es necesario una vez que el parámetro controlado ya no provoca la alarma.

Cuando la alarma es accionada con cerrojo, ésta requiere que el operador la reconozca. No obstante, este reconocimiento es necesario aunque el parámetro controlado ya no provoque la alarma. Este tipo de acción permite que el operador se entere de que una condición de alarma se produjo, aunque el parámetro controlado recupere su estado normal.

En ambos casos, el indicador de alarma destella cuando se debe reconocer una alarma. Si después del reconocimiento por parte del operador la condición de alarma del parámetro controlado aún persiste, el indicador de alarma permanecerá iluminado.

En el control de nivel se utilizan alarmas visuales y sonoras en el caso de alcanzarse ciertos valores inconvenientes para el proceso. Las hay también de interrupción para evitar inundaciones o sobrecalentamientos peligrosos.

La figura 38 muestra el hogar de una caldera pirotubular deformado porque un desperfecto en el control de nivel y en el sistema de alarmas dejó sin agua la caldera:

**Figura 38. Hogar de una caldera pirotubular deformado por efecto de una falla en el control de nivel**



## 4.2 Control de combustión

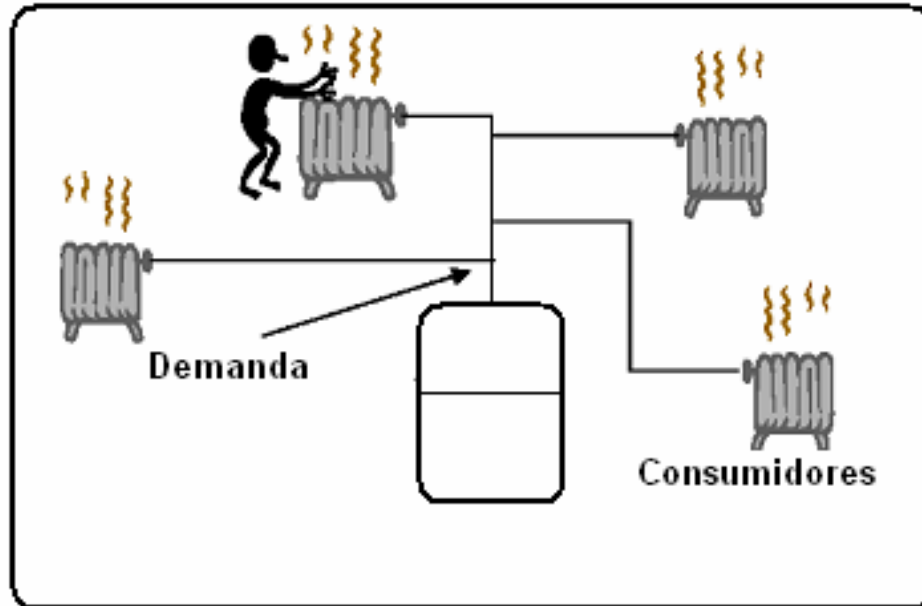
La regulación de la combustión se basa en mantener constante la presión de vapor en la caldera, tomándose sus variaciones como una medida de la diferencia entre el calor tomado de la caldera como vapor y el calor suministrado.

El controlador de la presión de vapor ajusta la válvula de control de combustible. La señal procedente del caudal de aire es disminuida en una relación determinada y se compara con el valor actual del caudal de combustible.

El propósito del sistema de control de combustión es proveer la combinación correcta de aire y combustible para producir segura y económicamente la cantidad requerida de vapor. La cantidad requerida de vapor es llamada **demanda**.

Con la olla y la estufa que analizamos al inicio del capítulo nos preocupamos únicamente por el nivel de la olla y el flujo de combustible. El vapor no estaba siendo utilizado para ninguna cosa. En lugar de la olla, veamos un tanque cerrado proveyendo vapor a radiadores en una casa (figura 39). Ahora que nosotros estamos produciendo vapor en un tanque cerrado, tenemos que tratar con la presión.

**Figura 39. Variaciones de la presión por el consumo de vapor**



Conforme se encienden los radiadores la presión en el domo de la caldera tiende a bajar, de manera contraria, si tenemos encendidos todos los radiadores y vamos apagando uno por uno la presión tenderá a subir. Necesitamos un sistema de control que responda a esas variaciones de carga de manera que la presión se mantenga constante, esa es la función del control de combustión.

En el sistema de control de combustión automático un controlador determina el *set point* para la demanda de vapor requerida. Cuando la planta demanda más vapor que el que esta siendo producido, la presión de vapor cae, lo cual causa que el controlador incremente la tasa de calentamiento (aumenta la llama). Lo opuesto es también cierto, disminución del uso del vapor incrementa la presión en la caldera y el controlador reduce la tasa de calentamiento. Además de incrementar o disminuir la tasa de calentamiento el control de combustión es responsable de mezclar el combustible y el aire en una proporción correcta para que la ebullición del agua no cause una explosión. Esto es llamado **control de relación aire/combustible**.

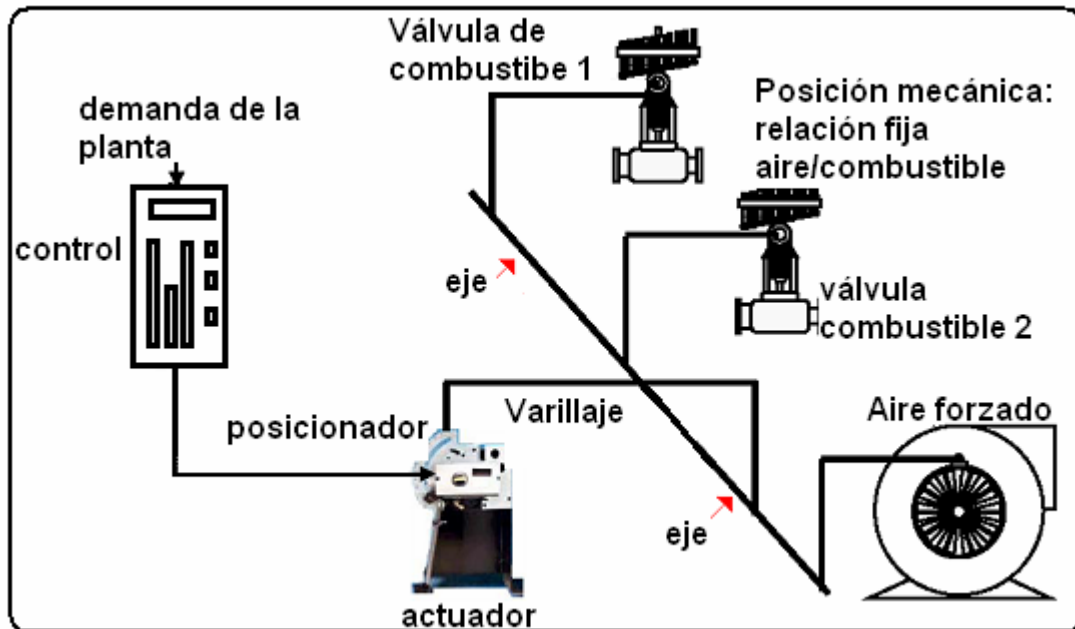


La relación aire/combustible es controlada usando uno de tres métodos, dependiendo en parte del tamaño de la caldera, cuanta eficiencia se quiere alcanzar, y cuanto piensa invertirse.

#### 4.2.1 Posición simple punto

En este método, un varillaje mecánico mueve una barra que a su vez actúa levas mecánicas que están *seteadas* físicamente a una determinada relación aire / combustible. Aunque este es el método menos eficiente, es el más simple y económico. (Figura 40).

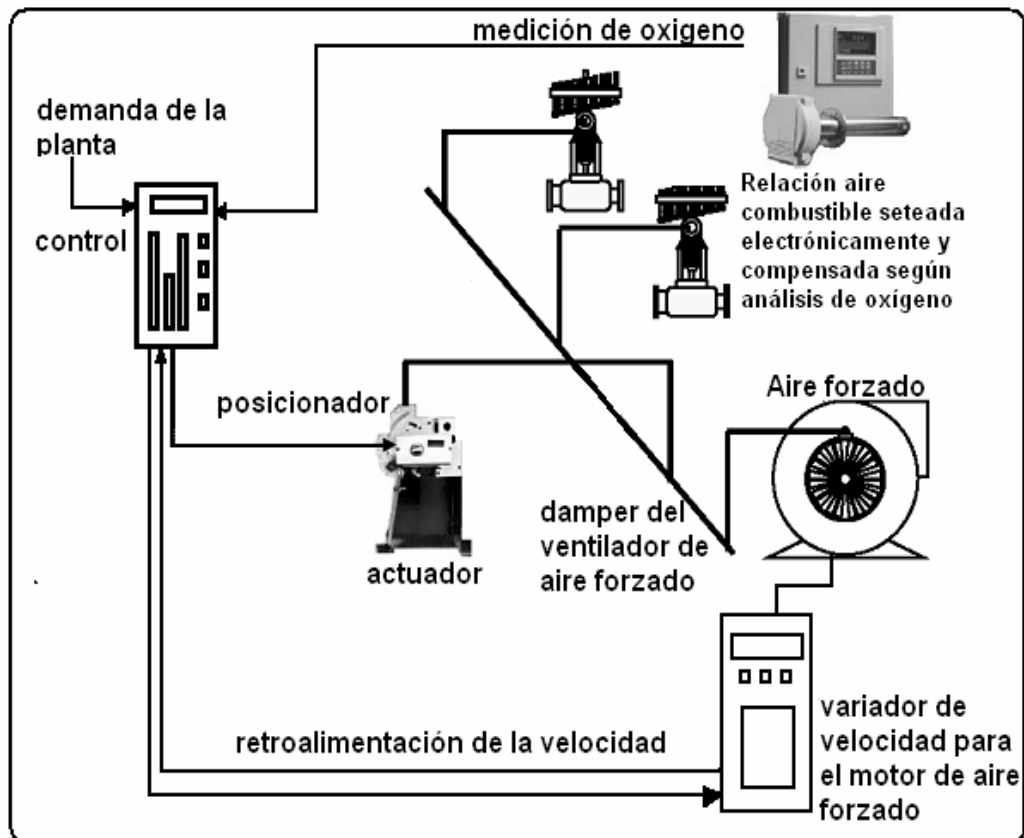
Figura 40. Control de combustión simple punto



#### 4.2.2 Posición paralela con equilibrio de Oxígeno

En este método, un analizador de oxígeno es instalado en la descarga de la chimenea para proveer una medición continua del aire en exceso (no quemado). El controlador compara esta señal con una tabla interna que es ingresada en la puesta en marcha, y calcula continuamente la relación óptima aire/combustible. En esta estrategia se agrega un variador de velocidad al motor del ventilador de aire forzado de manera que este pueda correr en velocidades más bajas. Este método da como resultados ahorro en combustible y electricidad y reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>. Se requieren pocos cambios a la instalación mecánica. (Figura 41).

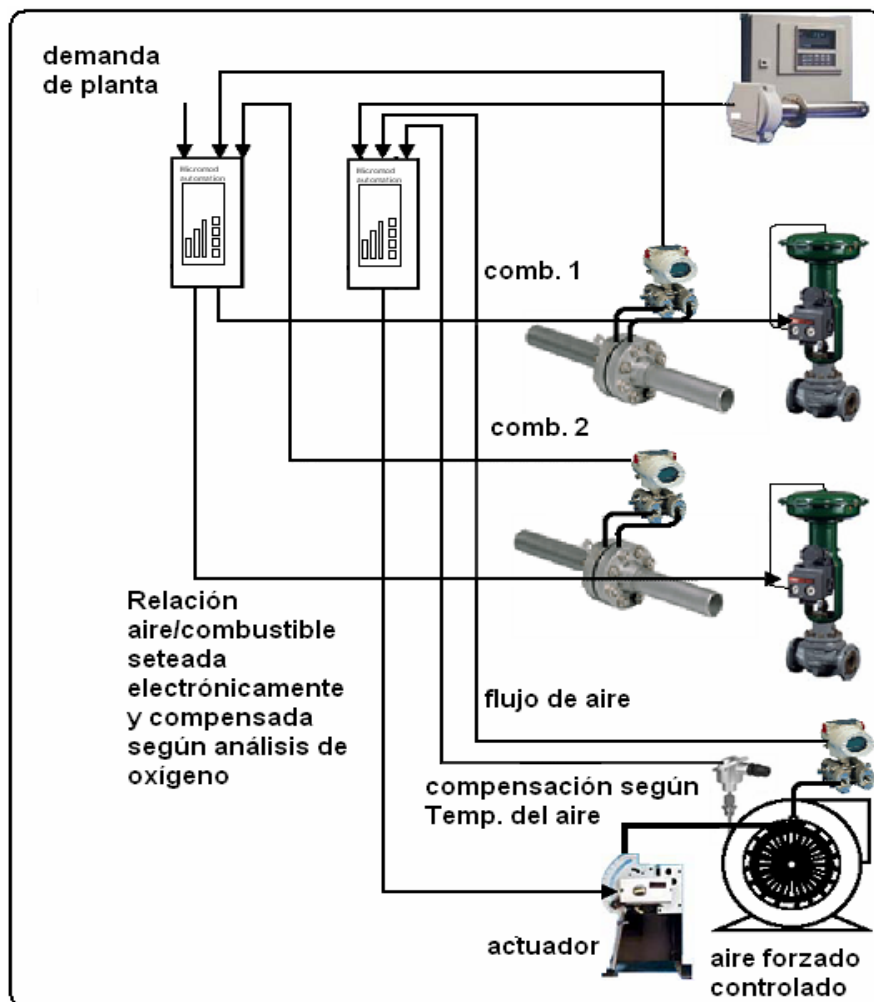
Figura 41. Control de combustión con compensación de oxígeno



### 4.2.3 Control de combustión con medición completa

Es el método más eficiente y seguro para el control de combustión. El aire y el combustible son medidos continuamente y controlados en paralelo con la demanda de la caldera para proveer una relación instantánea aire / combustible. Una característica de seguridad llamada “**limite de cruce**” protege contra condiciones peligrosas causando que la caldera pare si existe mucha demanda de combustible o muy poco flujo de aire. (Figura 42)

**Figura 42. Control de combustión con medición completa**



#### 4.2.4 Ventajas de actualizar el control de combustión

Veamos algunas razones por las que los sistemas más modernos en control de combustión deberían considerarse:

- a) **Reducción del costo de combustible:** los precios del combustible continúan elevándose y todo indica que esta tendencia continuará, y lo único que podemos hacer es asegurar que el uso que nosotros le demos al combustible sea el más eficiente posible. Eligiendo una buena estrategia de control podemos alcanzar ahorros en costos de combustible de 3 – 8%.
- b) **Asegurar el suministro de vapor:** un buen control de combustión junto con un adecuado control de nivel reduce los disparos de la caldera, mejora las respuestas a los cambios de demanda de vapor y permite suministrar el vapor de una manera más regular.
- c) **Reduce costos de electricidad:** específicamente cuando implementamos un control que requiera un variador de velocidad en el motor del ventilador pueden ahorrarse miles de dólares por año.
- d) **Incrementa la seguridad:** los controles modernos incluyen características de seguridad como límites en la salida del controlador, alarmas y disparos en bajas concentraciones de oxígeno, cambio a control manual con la pérdida de señales.
- e) **Reducción de emisiones:** en cuanto a las regulaciones ambientales, un buen control de combustión reduce los gases no quemados a la salida de la chimenea.

- f) **Retorno de la inversión:** según el tipo de control, los ahorros debido a las mayores eficiencias son tan significativos que los costos de la implementación de un nuevo sistema pueden pagarse en un año.

### **4.3 Control de TDS**

La concentración de sólidos en el agua de la caldera es conocida como sólidos disueltos totales o TDS por sus siglas en inglés. Para evitar problemas como la incrustación, por ejemplo, estas concentraciones deben mantenerse dentro de ciertos límites permisibles, esto es controlado en la mayoría de los casos, por medio de químicos que agregados al agua permiten la flotación o precipitación de los sólidos, que luego son evacuados por medio de purgas en la superficie para los sólidos flotando, o purgas en el fondo para los precipitados. En la siguiente sección veremos como la instrumentación ha facilitado este trabajo que de otra manera debería hacerse manualmente.

### **4.4 Agua de alimentación de caldera**

El agua de alimentación de la caldera es la suma del retorno de condensado más el agua de complemento, la primera es agua, en teoría, ya tratada, la segunda deberá recibir un tratamiento previo a sumarse al agua de alimentación, este es un tratamiento externo que busca reducir el nivel de sólidos disueltos por medio de desmineralización, osmosis inversa, etc, además la eliminación térmica o química del oxígeno para evitar oxidaciones en el sistema de vapor.

El tratamiento puede también ser interno y en ambos casos (interno y externo) la finalidad última es evitar depósitos de lodos e incrustación y la corrosión de las superficies internas de la caldera. Las incrustaciones duras que forman ciertos constituyentes en las zonas de elevada entrada de calor, retardan el flujo de éste y elevan la temperatura del metal. Esto puede dar lugar a sobrecalentamiento y falla de las partes a presión.

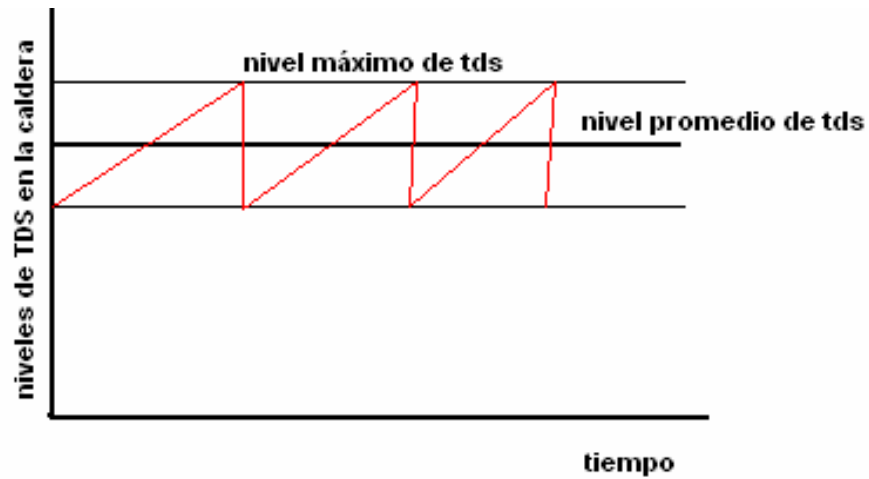
Las calderas pirotubulares necesitan de purgas para eliminar los sólidos concentrados en el agua de su interior. Las calderas acuotubulares utilizan purgas para fines similares aunque son pocos los modelos que realmente lo necesitan, siendo el más común la purga continua desde el domo de agua.

El fabricante de la caldera recomienda mantener la concentración de sólidos totales disueltos, TDS (por sus siglas en inglés), entre 2000 y 3000 partes por millón o ppm. Se prefiere trabajar cerca del límite superior ya que no se aprecian beneficios al mantenerlos al mínimo incrementando únicamente el costo del tratamiento.

Para este propósito se realizan purgas manuales cuya frecuencia se calcula según las horas de operación y la concentración de TDS del agua de alimentación de la caldera.

Las purgas manuales tienen el inconveniente que se realizan intermitentemente lo que provoca una concentración oscilante de los TDS. (Figura 43).

**Figura 43. Control manual de purgas de fondo**



Por otro lado cuando la cantidad de purga no es la adecuada se tienen los siguientes inconvenientes:

**Más purga:**

- Pérdidas de energía
- Pérdidas de agua
- Pérdidas de tratamiento

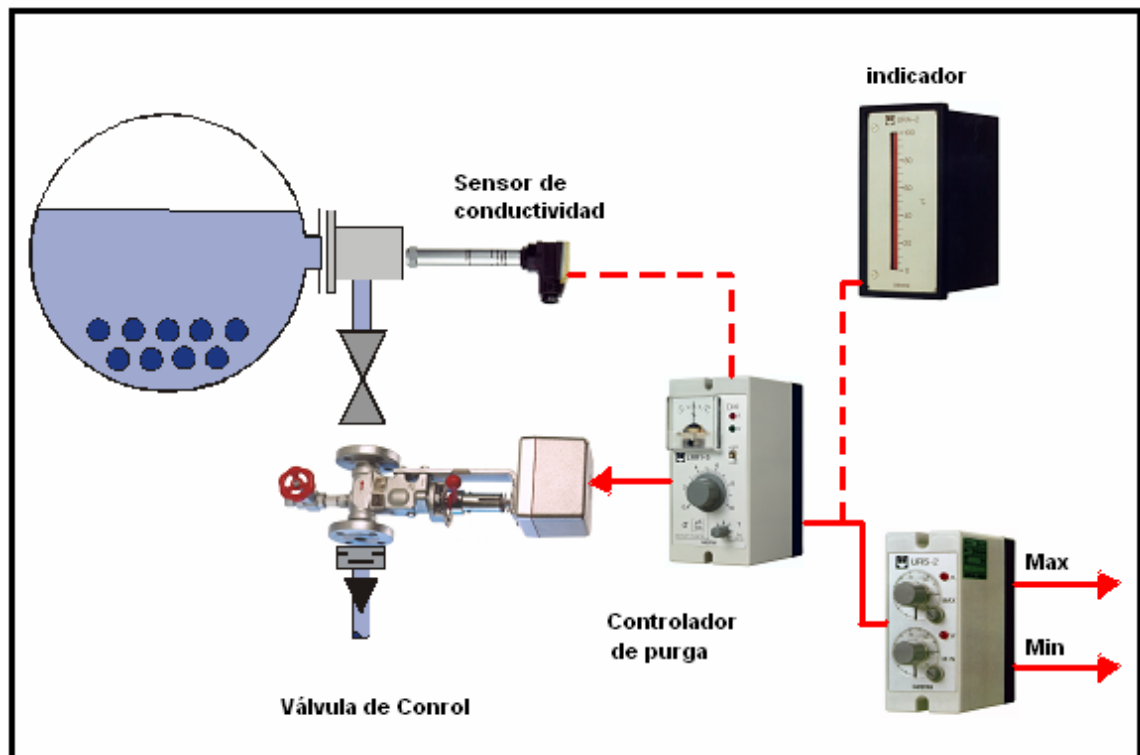
**Menos purga:**

- Aumento de sales
- Aumento de espumas
- Arrastres de agua con vapor

#### 4.4.1 Instrumentación y tratamiento interno del agua de caldera

Hoy en día la industria de automatización provee el equipo necesario para minimizar los problemas anteriores por medio de una purga continua en la superficie de la caldera. El sistema consiste de un sensor el cual determina el nivel de TDS por medio de la conductividad del agua de la caldera, la señal de este llega a un controlador que contiene el valor deseado y actúa sobre una válvula para mantener la concentración próxima a ese valor. Puede también el controlador contar con alarmas máxima y mínima fijadas convenientemente que incluso pueden detener la producción de vapor. (Figura 44).

**Figura 44. Control automático de purgas de superficie**





La purga de fondo no deberá eliminarse y puede hacerse también automáticamente a intervalos fijos para garantizar que no existan lodos en el fondo de la caldera. La válvula utilizada para el control de automático de la purga de fondo es similar a la de la figura 45 y su apertura y cierre es controlada por un temporizador integrado en el controlador.

**Figura 45. Válvula para el control de purgas de fondo**



#### **4.4.2 Instrumentación y tratamiento externo del agua de caldera**

El acondicionamiento externo del agua se realiza antes de que ésta entre a la caldera, dándole características deseables y eliminando las indeseables por medios físicos o químicos.

Existen actualmente instrumentos que facilitan el monitoreo y control de variables que dan cuenta de la calidad del agua antes de que esta ingrese a la caldera. Ejemplo de estas variables son la turbidez, el ph, oxígeno disuelto, etc. Estos instrumentos son colocados en el punto donde se requiere la medición y generan una señal proporcional a la concentración, la cual es recibida por un controlador que ejerce la acción correctiva generalmente sobre una válvula reduciendo el flujo del agua o haciéndola repetir el ciclo del tratamiento según la variable que se este midiendo. La mayoría de estas mediciones son todavía realizadas por medio de reactores químicos que aplicados al agua producen ciertos cambios de color según la concentración. La utilidad de los instrumentos modernos en el tratamiento externo del agua es bastante obvia, sin embargo, el costo inicial es relativamente alto.

Uno de los parámetros medidos en el agua de alimentación de la caldera antes de que ingresen a esta es la concentración de sólidos suspendidos y esta concentración es conocida como turbidez. La turbidez es una medida de la falta de transparencia de una muestra de agua debida a la presencia de partículas extrañas. Estas partículas pueden ser plancton, microorganismos, barro, etc.

La medida de la turbidez se efectúa para determinar el grado de penetración de la luz a través del agua y permite interpretar conjuntamente con la luz solar recibida y la cantidad de oxígeno disuelto el aumento o disminución del material suspendido en el agua.

La turbidez puede medirse en forma continua de dos maneras:

**Luz Reflejada:** una lámpara incandescente emite un rayo de luz que un sistema de lentes enfoca en la muestra de agua. Una célula fotoeléctrica capta la luz reflejada por las partículas en suspensión generando una corriente proporcional a la concentración de sólidos suspendidos.

**Luz absorbida:** la lámpara y la célula están situadas una enfrente de la otra, con una columna de la muestra de agua que las separa. La célula mide la absorción de la luz limitada cuya magnitud dependerá de la cantidad de sólidos en suspensión. (Figura 46).

**Figura 46. Sensores y monitor de turbidez**

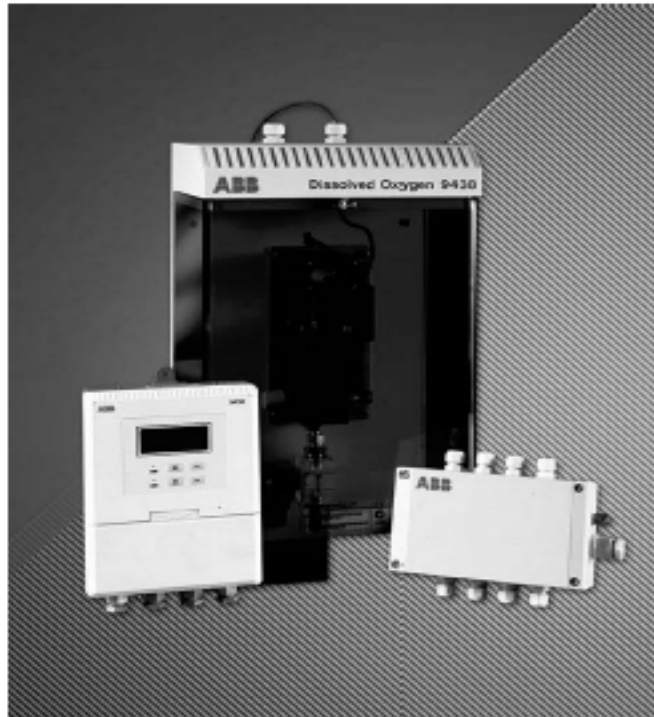


El oxígeno disuelto es la cantidad de oxígeno libre en el agua que no se encuentra combinado ni con el hidrógeno (formando agua) ni con los sólidos existentes en el agua.

La determinación de oxígeno disuelto es importante en el tratamiento de aguas y en el control de aireación.

El principio de funcionamiento de los instrumentos que permiten realizar esta medición es bastante complejo sin embargo el lazo de control de esta variable es similar a los analizados anteriormente. (Figura 47)

**Figura 47. Sensor de oxígeno disuelto**



El ph es una medida de la acidez o basicidad del agua y esta dado por el logaritmo negativo del comportamiento del ion hidrógeno. El efecto del ph en cuanto a corrosión de los metales a las temperaturas de operación de las calderas es semejante al efecto de la corrosión electroquímica (oxidación) sobre los metales a la temperatura ambiente.

El ph se mide en una escala de 0-14 adimensionalmente y el agua de alimentación de caldera debe tener un ph entre 9.5 y 11.5.

Existen varios tipos de instrumentos para medir el ph en la figura 48 se muestra un indicador digital y dos sensores de ph.

**Figura 48. Indicador y sensores de ph**

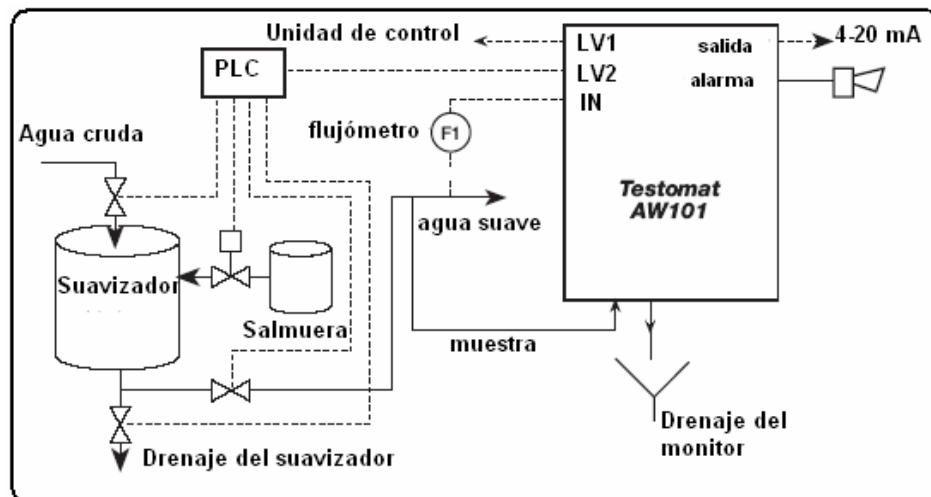


Otra variable de interés en el agua de alimentación es la dureza y esta indica la capacidad que tiene el agua para disolver o consumir el jabón, el agua que provoca espuma indica agua suave.

La dureza del agua la forman las sales disueltas de calcio y magnesio, hierro y aluminio. Se expresa en partes por millón de carbonatos de calcio.

Existen varios métodos para eliminar la dureza del agua y la medición de la misma se realiza en la mayoría de los casos con reactivos, sin embargo, existen instrumentos que son capaces de tomar muestras a intervalos convenientes y programables, añaden a la muestra un indicador que cambia el color a un nivel predeterminado de dureza. Esta reacción de color es monitorizada fotoeléctricamente y es incluso visible a través de una ventana en el panel frontal del instrumento. En caso de cambio de color que suponga resultado no satisfactorio se inicia una alarma. Además, puede generar una señal proporcional a la dureza medida la cual puede ser conducida hacia un controlador lógico programable para que se realice alguna acción como por ejemplo repetir el ciclo de ablandamiento. (Figura 49).

**Figura 49. Monitoreo de la dureza del agua en un sistema de ablandamiento**

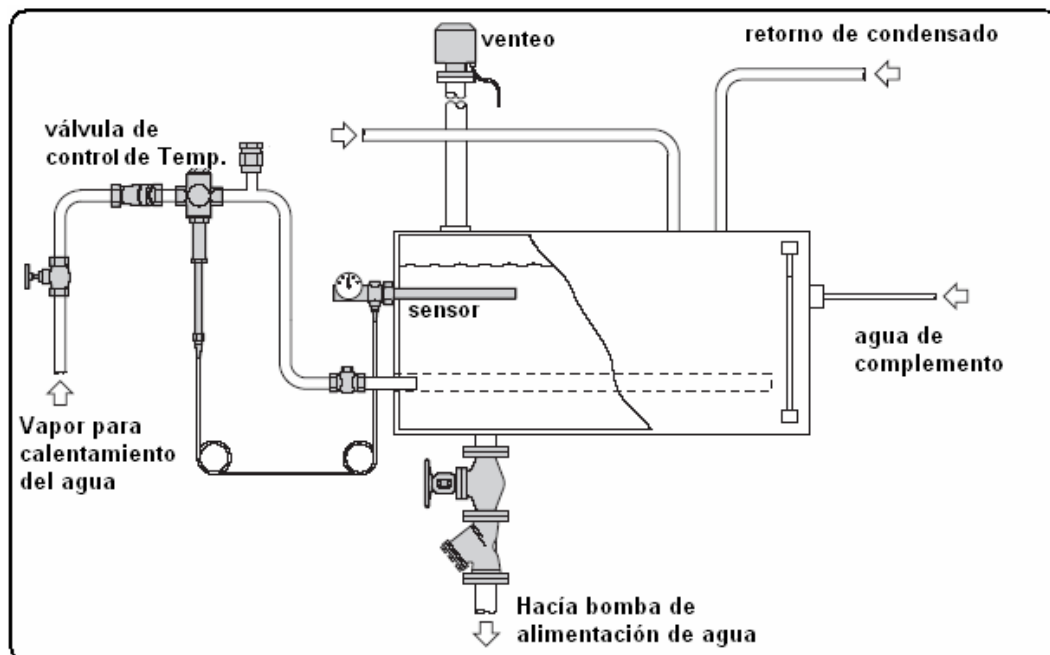


### 4.4.3 Instrumentación y manejo de condensado

Como mencionamos en el capítulo dos, el vapor que ha cedido su calor se condensa en los equipos consumidores y en las tuberías, este condensado es separado del vapor por medio de elementos mecánicos adecuados conocidos como trampas de vapor y conducido a un tanque de donde se tomará el agua directamente hacia la caldera ya que esta es agua que ya ha sido tratada.

La instrumentación que puede encontrarse en estos tanques es básicamente controladores de nivel, de temperatura y de presión según el diseño del tanque. En algunos tanques el agua de alimentación es mantenida a cierta temperatura para evitar choques térmicos en las paredes de la caldera, sin embargo, el agua no puede suministrarse a temperaturas mayores a los 90°C debido al fenómeno de la cavitación en las bombas. (Figura 50).

**Figura 50. Instrumentación en un tanque de condensado**

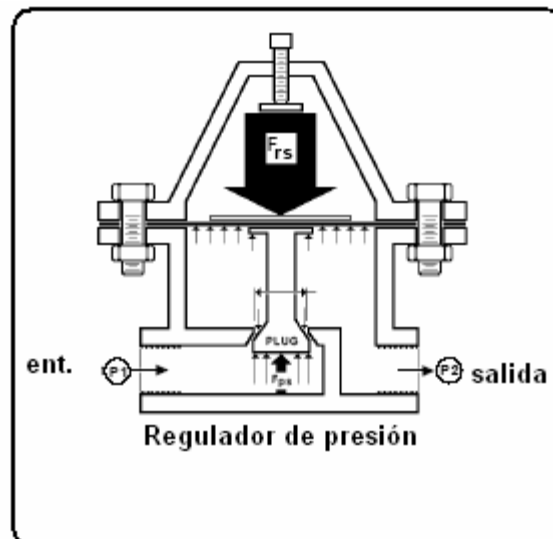


#### 4.5 Reguladores de presión auto-operados

Los controladores o reguladores de presión son dispositivos de control de flujo diseñados para mantener una presión constante ya sea aguas arriba o aguas debajo de su ubicación. Estos deben ser capaces de mantener la presión sin afectarse por los cambios en las condiciones operativas del proceso para el cual trabajan.

Un regulador básicamente es una válvula de recorrido ajustable conectada mecánicamente a un diafragma. (Ver figura 51). El diafragma se equilibra con la presión de salida o presión de entrega y por una fuerza aplicada del lado contrario, a la cara que tiene contacto con la presión de salida. La fuerza aplicada del lado opuesto al diafragma puede ser suministrada por un resorte, un peso o presión aportada por otro instrumento denominado piloto.

**Figura 51. Regulador de presión**





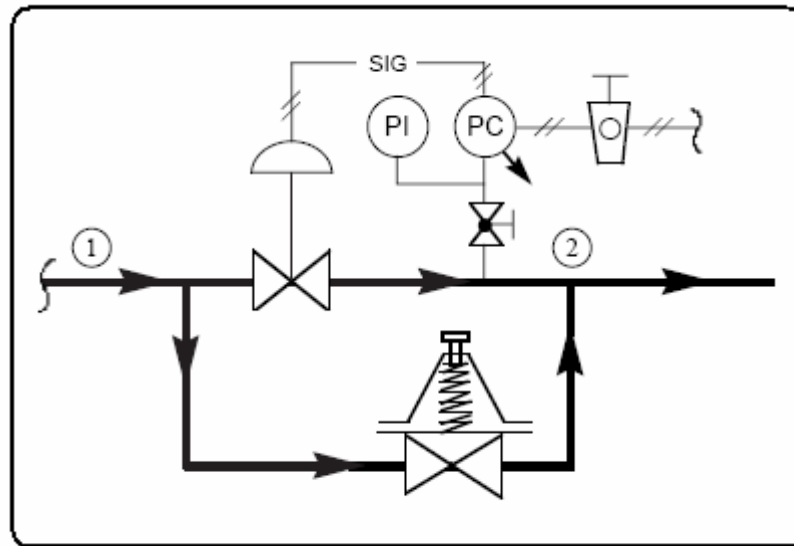
Estos dispositivos son menos precisos que un lazo de control completo pero se prefieren cuando las condiciones lo permiten debido a su bajo costo relativo y encuentran una amplia aplicación en el manejo de vapor. Existen para controlar presión flujo o temperatura.

Estos reguladores asumen todas las tareas requeridas en un lazo de control. Estos integran un sensor de medición, un controlador así como un elemento de control, todo en un mismo sistema. La combinación de estos elementos resulta en dispositivos rígidos a precios razonables.

Debido a que estos reguladores, como su nombre lo indica, no requieren energía auxiliar de fuentes externas, el costo de la instalación es significativamente más bajo que para la instrumentación convencional.

Puede también combinarse un lazo de control de presión con un regulador por ejemplo ajustando el regulador a una presión promedio y utilizando el lazo de control para corregir las desviaciones menores. (Figura 52).

**Figura 52. Control de presión con un regulador e instrumentación convencional**



Los reguladores de presión se utilizan en el suministro de vapor generalmente porque la presión de diseño del equipo es inferior a la presión disponible, además que se incrementa la vida de los equipos.

## 5 TRANSMISORES DE PRESIÓN ELECTRÓNICOS

En las calderas en las que se ha implementado el control de nivel modulante, la medición de nivel se lleva a cabo, en la mayoría de los casos, por medio de un transmisor de presión diferencial, es decir, el nivel es medido indirectamente por medio de la presión hidrostática ejercida por el nivel del agua en la caldera según la ecuación:

$$P = P_o + \rho gh$$

Donde:

$P$  = Presión en la toma inferior del transmisor (Pa)

$P_o$  = Presión en la toma superior del transmisor (Pa)

$\rho$  = Densidad ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$g$  =  $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$

$h$  = Altura (nivel) del agua en la caldera (m)

Las dimensionales pueden variar según nuestra conveniencia siempre que sean congruentes.

Debido a la importancia que representa el control de nivel del domo de la caldera y al uso casi general que tienen los transmisores de presión diferencial para dicha medición este capítulo se dedica exclusivamente a estos instrumentos.

## 5.1 Definición

Los transmisores son instrumentos que captan la variable del proceso y la transmiten a distancia a otro instrumento receptor que puede ser un indicador, registrador, controlador o una combinación de estos. Existen varios tipos de señales de transmisión: neumáticas, electrónicas, digitales, hidráulicas.

Los transmisores neumáticos generan una señal neumática normalizada de 3-15 psi (libras por pulgada cuadrada), estos ya casi no se utilizan.

Los transmisores electrónicos emplean la señal normalizada de 4-20 mA, se puede usar a distancias de 200 m hasta 1Km, todavía pueden encontrarse transmisores que envían señales de 1-5 V, 10-50 mV, 1-5 mA, 0-20 mA, utilizados antes de la normalización de 4-20 mA.

El microprocesador se utiliza en los transmisores por las ventajas de rapidez de cálculo, pequeño tamaño, confiabilidad, precio cada vez más competitivo y por ser capaz de realizar cálculos adicionales dentro del propio transmisor.

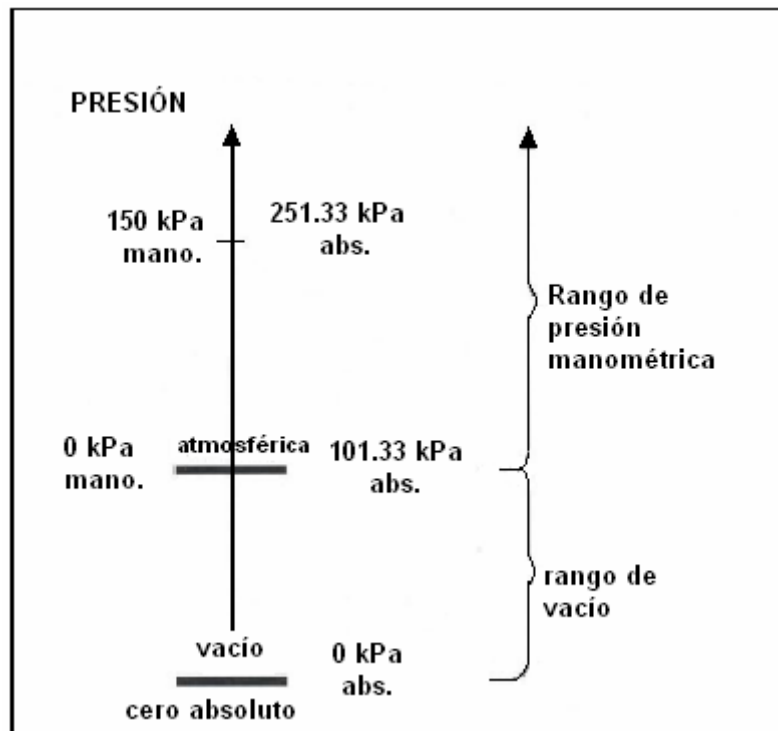
Los controladores reciben las señales procedentes de los transmisores las indican y/o registran. Los controladores envían otra señal de salida, normalmente de 3-15 psi en señal neumática, o 4-20 mA en señal eléctrica de corriente. Esta señal de salida actúa sobre el elemento final de control, como por ejemplo una válvula.

## 5.2 Tipos de presión

La presión es una fuerza por unidad de superficie y puede expresarse en unidades tales como pascal, bar, atmósferas, kilogramos por centímetro cuadrado y psi (libras por pulgada cuadrada).

La presión puede medirse en valores absolutos o diferenciales. En la figura 53 se indican las clases de presión que los instrumentos miden comúnmente en la industria.

**Figura 53. Clases de presión**



### **5.2.1 Presión Absoluta**

Se mide con relación al cero absoluto de presión.

### **5.2.2 Presión atmosférica**

Es la presión ejercida por la atmósfera terrestre medida mediante un barómetro. A nivel del mar, esta presión es próxima a 760 mm de mercurio absolutos o 1.013 Bar absolutos, y estos valores definen la presión ejercida por la atmósfera estándar.

### **5.2.3 Presión relativa o manométrica**

Es la determinada por un elemento que mide la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica del lugar donde se efectúa la medición. Hay que señalar que al aumentar o disminuir la presión atmosférica, disminuye o aumenta respectivamente la presión leída, aunque esto es despreciable al medir presiones elevadas.

### **5.2.4 Presión diferencial**

Es la diferencia de presiones entre dos puntos. La presión relativa es pues una presión diferencial con la presión atmosférica como uno de los puntos.

### **5.2.5 Vacío**

Es la diferencia de presiones entre la presión atmosférica existente y la presión absoluta, es decir, es la presión medida por debajo de la atmosférica. Generalmente se expresa en mm columna de mercurio, mm columna de agua o pulgadas columna de agua. Las variaciones de la presión atmosférica influyen considerablemente en las lecturas del vacío.

### **5.3 Principio de medición de los transmisores de presión**

Los transmisores de presión pueden clasificarse de manera general en neumáticos y electrónicos, sin embargo los primeros tienen cada vez menos aplicación debido a factores como precisión y tiempo de respuesta. En la siguiente sección se estudian brevemente los transmisores de presión electrónicos debido a la aplicación casi general que tienen actualmente.

### **5.4 Tipos de transmisores de presión electrónicos**

En realidad los transmisores más utilizados actualmente para medir presión contienen elementos electromecánicos y se clasifican según el principio de medición.

Los fabricantes de los transmisores de presión son los encargados de seleccionar el tipo de sensor según el rango de presiones a trabajar y la aplicación específica, información proporcionada por el usuario final.

#### **5.4.1 Piezoeléctrico**

Los elementos piezoeléctricos son materiales cristalinos que, al deformarse físicamente por la acción de una presión, generan una señal eléctrica. Dos materiales típicos en los transductores piezoeléctricos son el cuarzo y el titanato de bario.

#### **5.4.2 Resistivo**

Es uno de los transmisores eléctricos más sencillos. Consisten en un elemento elástico que varía la resistencia óhmica de un potenciómetro en función de la presión. El potenciómetro puede adoptar la forma de un solo hilo continuo o bien estar arrollado a una bobina siguiendo un valor lineal o de resistencia.

#### **5.4.3 Capacitivo**

Se basan en la variación de capacidad que se produce en un condensador al desplazarse una de sus placas por la aplicación de presión. La placa móvil tiene forma de diafragma y se encuentra situada entre dos placas fijas. De este modo se tienen dos condensadores uno de capacidad fija o de referencia y el otro de capacidad variable, de la comparación de ambos puede determinarse la presión.



#### **5.4.4 Magnético**

Consiste en un imán permanente o un electroimán que crea un campo magnético dentro del cual se mueve una armadura de material magnético.

El circuito magnético se alimenta con una fuerza magnetomotriz constante con lo cual al cambiar la posición de la armadura debido a la presión, varía el flujo magnético. Esta variación del flujo da lugar a una corriente inducida en la bobina que es, por tanto, proporcional al grado de desplazamiento de la armadura móvil.

#### **5.4.5 Extensométrico**

Se basan en la variación de la longitud y de diámetro, y por lo tanto de resistencia, que tiene lugar cuando un hilo de resistencia se encuentra sometido a una tensión mecánica por la aplicación de una presión.

### **5.5 Comunicación y señales**

Conforme los procesos se vuelven más exigentes los proveedores de instrumentos han creado tecnologías cada vez más confiables y veloces en cuanto a la transmisión de datos se refiere.

La señal 4-20 mA y los protocolos de comunicación que se describen más adelante se aplican actualmente en la mayoría de instrumentos de campo.

Un **Protocolo de comunicación** se define como el conjunto formal de reglas convencionales que rigen el formato y la sincronización relativa al intercambio de mensajes entre dos o más dispositivos en una red de comunicaciones.

La mayor parte de las comunicaciones entre los instrumentos de proceso y el sistema de control se basan en señales analógicas (neumáticas 3-15 psi utilizadas en pequeñas plantas y en las válvulas de control y electrónicas de 4-20 mA c.c.). Sin embargo, los instrumentos digitales capaces de manejar grandes volúmenes de datos y guardarlos en unidades históricas están aumentando día a día sus aplicaciones. Su precisión es una diez veces mayor que la de la señal clásica de 4-20 mA c.c. En lugar de enviar cada variable por un par de hilos (4-20 mA c.c.) transmiten secuencialmente las variables a través de un cable de comunicaciones llamado bus.

La tecnología *fieldbus* o bus de campo es un protocolo de comunicaciones digital de alta velocidad que esta en camino de sustituir a la clásica señal analógica de 4-20 mA c.c. en todos los sistemas de control distribuido y controladores programables PLC, instrumentos de medida y transmisión y válvulas de control.

Dentro de un proceso se miden, supervisan y controlan las variables más relevantes del mismo. Las variables dentro de un proceso se miden con el propósito de supervisarlas, y/o con el propósito de llevar a cabo acciones de control a partir de su medición. Es importante resaltar que existen variables que por la naturaleza del proceso, si llegasen a salir de un cierto rango considerado como máximo o mínimo permisible (ya sea en forma repentina o paulatina), pudieran llegar a poner en riesgo al personal, al medio ambiente, a la instalación y/o a la calidad y cantidad de los productos que se producen; si no se realizan las acciones de control apropiadas en el tiempo adecuado.

Se debe establecer una clara definición de la categorización de las variables medidas en los diferentes procesos que se operan en las plantas industriales, las cuales se han identificado en dos grupos:

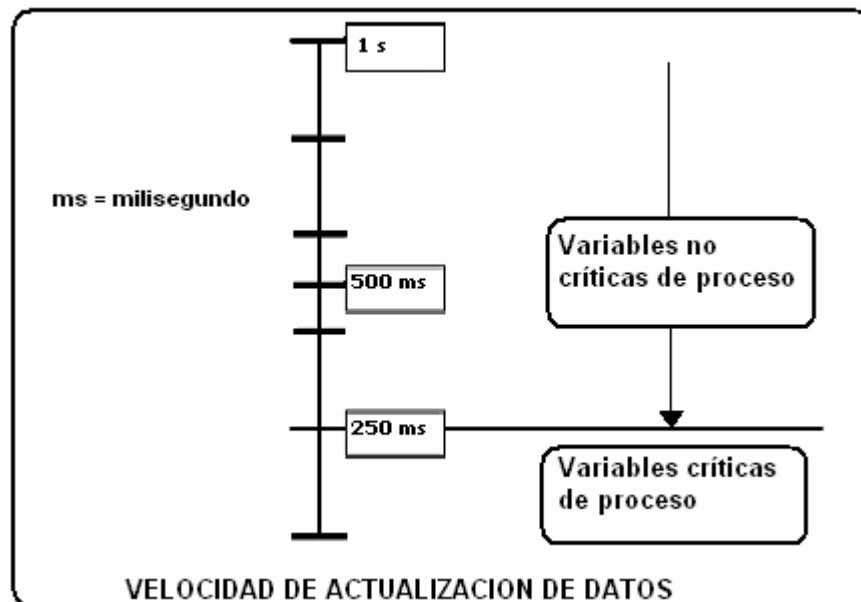
- Variables no críticas
- Variables críticas.

El criterio o factor considerado para establecer dicha categorización, es la velocidad de actualización de la variable de proceso medida. Este criterio se debe interpretar como la rapidez que se requiere para leer en tiempo real el valor de la variable medida, y realizar las acciones de control, en caso de que así sea requerido; para llevar las condiciones de proceso a un estado seguro y así no poner en riesgo al personal, al medio ambiente y/o a las instalaciones mismas.

La velocidad de actualización, es el tiempo que transcurre, desde que el instrumento deja los datos en el canal de comunicación, hasta que estos llegan al controlador a través de tarjetas de entrada / salida o tarjetas de comunicación.

En la figura 54 se muestran las categorías de variables en función de la velocidad de actualización del valor medido de las variables.

**Figura 54. Variables críticas y no críticas de proceso**



El fundamento de esta categorización se explica a continuación. Para la categorización de las variables con base en el criterio de velocidad de actualización, se toman en cuenta las velocidades en el canal de comunicación especificadas por las diferentes tecnologías. Estas velocidades son:

|                     |             |
|---------------------|-------------|
| “HART”              | 1,200 bps*  |
| FIELDBUS FOUNDATION | 31,250 bps* |
| “PROFIBUS”          | 31,250 bps* |

\* Bytes por segundo

Primero describiremos la clásica señal 4-20 mA y luego un pequeño concepto de las principales variantes de la comunicación *fieldbus*.

### 5.5.1 Señal analógica

La mayoría de transmisores electrónicos generan la señal estándar de 4-20 mA c.c. a distancias de 200 m a 1 km, según el tipo de instrumento transmisor. Como se mencionó al inicio del capítulo todavía pueden encontrarse transmisores que envían las señales 1-5 mA c.c., 10-50 mA c.c., 0-20 mA c.c., 1-5 V c.c. que fueron utilizadas antes que se normalizase como señal analógica en los transmisores la señal de 4-20 mA c.c.

La señal 1-5 V c.c. es útil cuando existen problemas en el suministro electrónico. De todos modos, basta conectar una resistencia de 250  $\Omega$  para tener la señal electrónica de 4-20 mA c.c.

La señal electrónica de 4-20 mA c.c. tiene un nivel suficiente y de compromiso entre la distancia de transmisión y la robustez del equipo. Al ser continua y no alterna, elimina la posibilidad de captar perturbaciones, está libre de corrientes parásitas y emplea sólo dos hilos que no precisan blindaje.

La relación 4-20 mA c.c. es de 1 a 5, la misma que la razón de 3-15 psi en la señal neumática y el nivel mínimo seleccionado de 4 mA elimina el problema de la corriente residual que se presenta al desconectar los circuitos a transistores. La alimentación de los transmisores puede realizarse con una unidad montada en el panel de control y utilizando el mismo par de hilos del transmisor esto último es conocido como *two wire*.

El cero vivo con que empieza la señal (4 mA c.c.) ofrece las ventajas de poder detectar una avería por corte de un hilo (la señal se anula) y de permitir el diferenciar todavía más el ruido de la transmisión cuando la variable esta en su nivel más bajo.

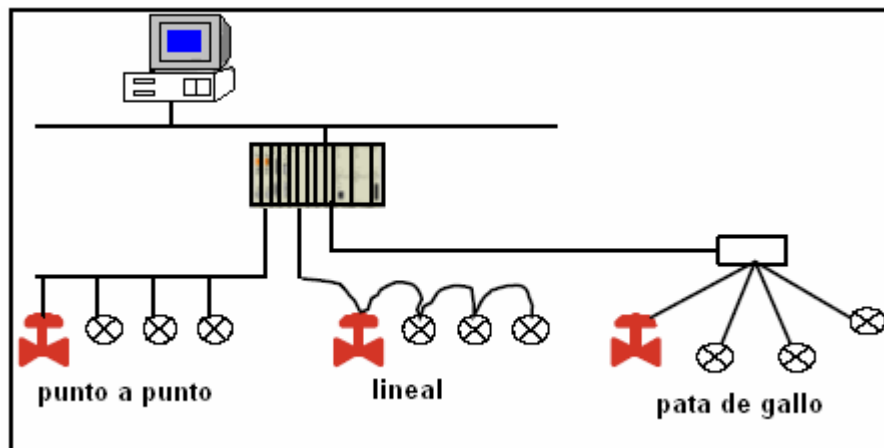
### **5.5.2 *Fieldbus Foundation***

Protocolo de comunicación completamente digital, para equipo de campo (H1) y subsistemas de control. H1 es la Especificación de la Fundación de *Fieldbus* para la comunicación entre instrumentos de campo, en la cual se lleva a cabo el control del proceso. Opera a 31.25 Kbits/s y usa 2 hilos sobre los cuales se alimenta a los dispositivos en caso de así requerirlo y se realizan las comunicaciones tanto a los subsistemas de control como entre los dispositivos de red.

Un transmisor con la comunicación *Fieldbus Foundation* es un sistema completo, con las funciones de control distribuidas en los equipos de campo, permitiendo también la operación desde un cuarto de control utilizando la comunicación digital, la cual permite el cambio remoto de la configuración, de la calibración, etc.

La selección establecida para la aplicación de este protocolo es acorde al criterio de velocidad de actualización del valor de la variable medida del proceso en el canal de comunicación. Así mismo la selección del protocolo de comunicación "*Fieldbus Foundation*" se establece para aplicaciones de monitoreo y/o control de variables críticas de proceso y variables no críticas de proceso, sistemas de seguridad y sistemas intrínsecamente seguros. En variables críticas y variables no críticas de proceso para propósitos de monitoreo y/o control, las conexiones deben ser punto a punto, lineal, pata de gallo y/o en estrella. (Figura 55)

**Figura 55. Conexión de instrumentos con tecnología *fieldbus***



### 5.5.3 *Profibus*

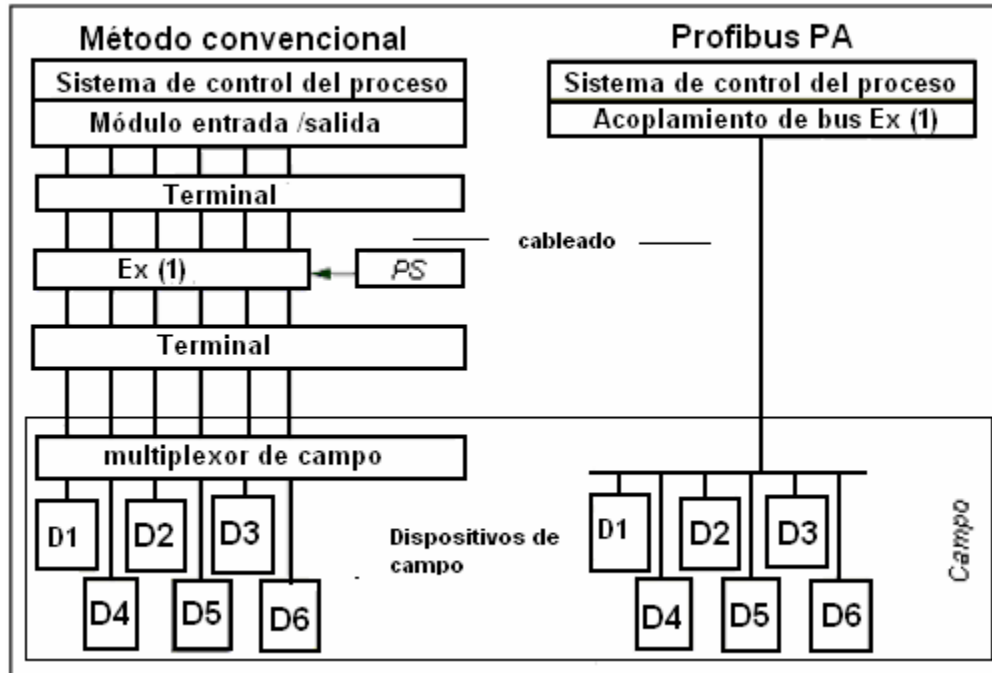
*Profibus* es un protocolo abierto existente, con un amplio rango de aplicaciones en la industria de la manufactura, proceso y automatización. *Profibus* consiste de tres protocolos distintos intercompatibles el más utilizado es el protocolo *Profibus PA* diseñado específicamente para la automatización de procesos..

La selección establecida para la aplicación de este protocolo, concuerda con el criterio de velocidad de actualización del valor de la variable medida del proceso en el canal de comunicación. Así mismo la selección del protocolo de comunicación “*profibus*” se establece para aplicaciones de monitoreo y/o control de variables críticas de proceso y variables no críticas de proceso, sistemas de seguridad y sistemas intrínsecamente seguros.

*Profibus PA* es la solución a los procesos de automatización. *Profibus* conecta los sistemas de automatización y los sistemas de control de procesos con los dispositivos de campo, como son los transmisores de presión, temperatura y nivel. *Profibus* con la variante *Profibus PA* puede ser usado como sustituto para la tecnología analógica de 4 a 20 mA. Los logros del *profibus-PA* producen un ahorro del 40% en proyecto, cableado y mantenimiento, y ofrece un incremento significativo en funcionalidad y seguridad. La figura 56 muestra las diferencias entre cablear un sistema convencional de 4 a 20 mA y un sistema basado en *Profibus-PA*.



Figura 56. Comparación entre comunicación *Profibus* y 4-20 mA



Cuando se usa el método convencional de cableado, cada línea individual de señal debe estar conectada al módulo I/O del sistema de control del proceso. Para cada aparato se requiere una fuente de energía distinta. Como contraste, cuando se usa *profibus-PA*, sólo se necesita una línea de dos cables para transmitir toda la información y la energía a los dispositivos de campo. Esto no solo produce ahorro en el cableado, sino que reduce el número de módulos de entrada y salida (I/O) requeridos en los sistemas de control de procesos. *Profibus-PA* permite medir, controlar y regular mediante una línea simple de dos cables. También permite la alimentación de los dispositivos de campo incluso en áreas intrínsecas de seguridad. Permite el mantenimiento y la conexión / desconexión de los aparatos durante la operación sin afectar a otras estaciones, incluso en áreas potenciales de explosión. *Profibus-PA* ha desarrollado los requisitos especiales de esta área de aplicación en estrecha cooperación con los usuarios en el proceso industrial (NAMUR):

- Perfiles de aplicación únicos para el proceso de automatización y la capacidad de cambio de los dispositivos de campo para diferentes proveedores.
- La adición o sustracción de estaciones del bus incluso en áreas intrínsecas de seguridad sin influencia en otras estaciones.
- Comunicación transparente por medio de parejas de segmentos entre los segmentos del *profibus-PA* en procesos de automatización de la fabricación.
- Alimentación a distancia y transmisión de datos a lo largo de los mismos dos cables basándose en la *tecnología* IEC 1158-2.
- Uso en áreas potenciales de explosión con protección a explosión tipo “intrínseca de seguridad” o “no intrínseca de seguridad”.

En variables críticas y variables no críticas de proceso para propósitos de monitoreo y/o control, las conexiones deben ser punto a punto, lineal y/o en estrella.

Para las variables críticas se debe considerar que el tiempo de actualización en el canal de comunicación no debe exceder de 250 ms, tomando en cuenta los siguientes factores: topología, distancia, cantidad de información y número de participantes.

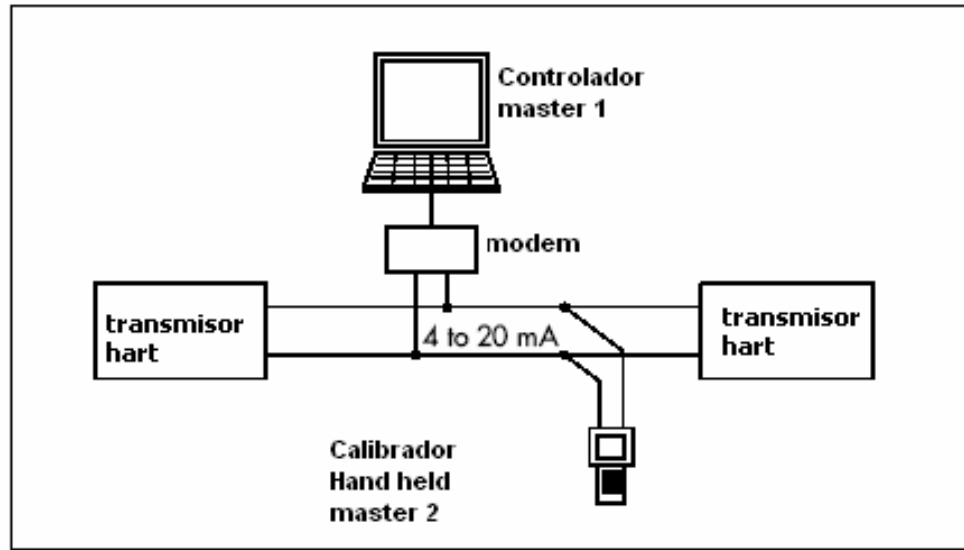
#### 5.5.4 *Hart*

*Highway Addressable Remote Transducer.* Protocolo de comunicación para transmisores. Emplea una señal de 4 - 20 mA para la representación de la variable, y una señal sobrepuesta sobre la señal de 4 - 20 mA denominada codificación de corrimiento en frecuencia (FSK) para la comunicación remota con un controlador, dispositivo de configuración o sistema para la administración del mantenimiento.

Los transmisores *Hart* comunican sus datos sobre las líneas de transmisión del sistema de 4-20 ma. Esto les permite ser parametrizados e iniciados de una manera flexible o leer datos medidos y almacenados. Estas tareas requieren que los transmisores estén basados en la tecnología de microprocesador y son llamados generalmente transmisores inteligentes (*smart transmitters*).

Introducido en 1989, este protocolo ha sido probado satisfactoriamente en muchas aplicaciones industriales y permite la comunicación bidireccional aún en ambientes peligrosos. El *hart* permite el uso de hasta dos master es decir dos dispositivos enviando órdenes al instrumento. Uno puede ser el controlador y otro una computadora o un calibrador electrónico de mano (*hand held*). (Figura 57)

**Figura 57. Comunicación Hart**



Las características de funcionamiento más importantes del protocolo *hart* incluyen:

- Probado en la práctica, fácil de mantener y utilizar
- Compatible con instrumentación analógica convencional (4-20 mA c.c.).
- Comunicación analógica y digital simultánea
- Comunicación punto a punto o red
- Acceso flexible a los datos por medio de dos dispositivos master
- Tiempo de respuesta aproximado 500 ms
- En topología multiconexión el número de instrumentos máximo que se deben interconectar en el canal de comunicación es de 15.

La selección establecida para la aplicación de este protocolo es acorde al criterio de velocidad de actualización del valor de la variable medida del proceso en el canal de comunicación. Así mismo la selección del protocolo de comunicación “*HART*” se establece para aplicaciones de monitoreo y/o control de variables críticas de proceso y variables no críticas de proceso, sistemas de seguridad y sistemas intrínsecamente seguros.

## **5.6 Aplicaciones de los transmisores de presión en la medición de nivel**

Los transmisores de presión pueden utilizarse para la medición de nivel ya sea en tanques abiertos o en tanques cerrados. Los más utilizados son los transmisores de presión diferencial es decir los que envían una señal proporcional a la diferencia de presiones existente entre dos puntos sensados y elegidos convenientemente.

Un transmisor de presión diferencial consiste en un diafragma en contacto con el líquido del tanque (Figura 58), que mide la presión hidrostática en un punto del fondo del depósito.

**Figura 58. Transmisores de presión diferencial**



### 5.6.1 Tanque abierto

En un tanque abierto la presión hidrostática es proporcional a la altura del líquido y a su gravedad específica según la ecuación:

$$P = h\rho g$$

en la que,

P = presión (Pa)

h = altura del líquido que se encuentra sobre el instrumento (m)

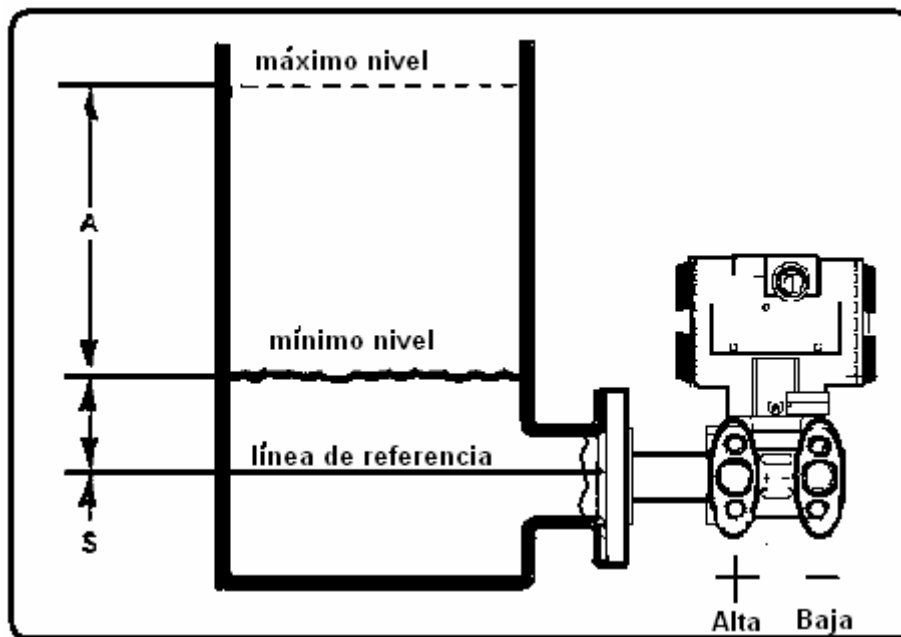
$\rho$  = densidad del líquido (kg/m<sup>3</sup>)

g = 9.8 m/s<sup>2</sup>

Cuando se use el transmisor para medir el nivel en un tanque abierto, debe conectarse la parte alta del primario cerca del fondo del tanque. La parte baja del primario debe quedar al aire libre.

En la figura 59 se ve una instalación recomendable para tanque abierto, el nivel mínimo debe ser el de la línea de referencia o mayor.

**Figura 59. Medición de nivel con un transmisor de presión diferencial en un tanque abierto**



### 5.6.2 Tanque cerrado

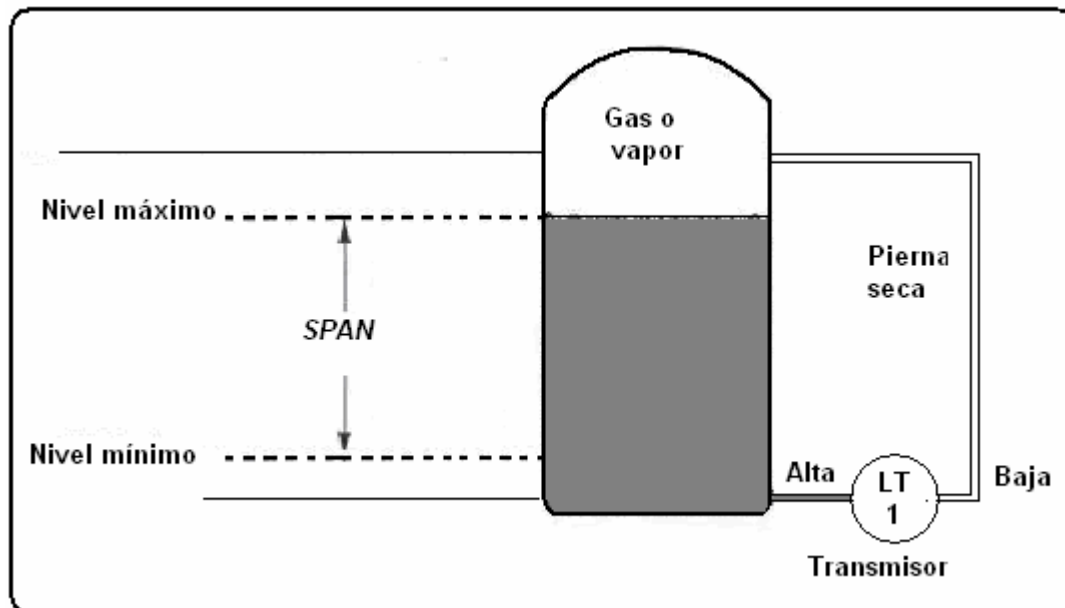
En el caso en que el tanque esté cerrado y bajo presión hay que corregir la indicación del aparato para la presión ejercida sobre el líquido perdiendo precisión, se suele conectar un tubo a la parte superior del tanque y medir la presión diferencial entre la toma inferior y la superior, cuando los gases de la parte superior del tanque son condensables la toma superior tendrá mayor presión que la inferior, por lo tanto habrá que cambiar las conexiones del instrumento ya que sino indicará bajo cuando esté alto y viceversa.

La línea de presión baja del transmisor es llamado pierna de referencia. Hay 2 piernas de referencia usadas en el proceso industrial.

La **pierna seca** no contiene líquido, así que la presión del gas o vapor en el tanque, es aplicado directamente al lado bajo del transmisor, (ver figura 61). La salida del transmisor varía proporcionalmente al nivel del líquido.



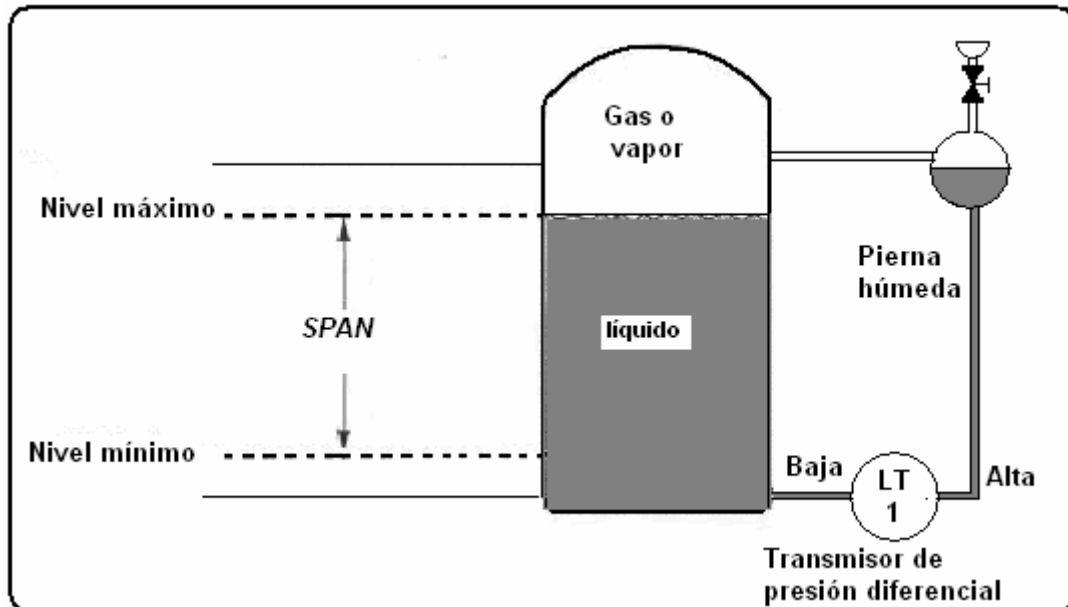
**Figura 60. Conexión de un transmisor de presión diferencial para medición de nivel en un tanque cerrado con *pierna seca***



Cuando los gases o vapores encima del líquido son condensables, la línea desde la toma superior se llena gradualmente con el condensado hasta llenar todo el tubo, en cuyo caso la tubería dibujada a la derecha del transmisor LT 1 de la figura 60 tendrá mayor presión que la tubería izquierda y, por lo tanto, habrá que cambiar las conexiones del instrumento ya que éste indicará bajo cuando el nivel sea alto y viceversa. A la pierna de la derecha se le conoce como pierna húmeda.

Se instala una botella en la parte alta de la pierna para que ésta se mantenga siempre llena. Ver figura 61.

Figura 61. Conexión de un transmisor de presión diferencial para medición de nivel en un tanque cerrado con *pierna húmeda*



Al calibrar el transmisor utilizado con pierna húmeda hay que tomar en cuenta el peso específico del líquido.

La salida del transmisor varía directamente proporcional con el nivel del líquido.

La ecuación que relaciona el nivel del líquido de un depósito,  $h$ , con la presión hidrostática del líquido,  $P_g$ , es la siguiente:

Sistema internacional:

$$h = \frac{P_g * 1000 \text{ Pa/kPa}}{\rho g} = \frac{P_g * 0.102 \text{ m/kPa}}{SG}$$

donde:

h = nivel del líquido (m)

P<sub>g</sub> = presión hidrostática del líquido (kPa)

ρ = densidad del líquido (kg/m<sup>3</sup>)

g = gravedad (m/s<sup>2</sup>)

SG = gravedad específica del líquido

1 kPa corresponde a una columna de agua de 0.102 m a 15.5 °C.

Esta ecuación nos indica que el nivel del líquido varía directamente proporcional a la presión hidrostática del líquido. Asumimos que la temperatura y la densidad del líquido permanecen constantes en el depósito. Un cambio en la temperatura o densidad del líquido necesita recalibración el transmisor. Por ejemplo, un líquido al incrementar la temperatura, la densidad del líquido disminuye pero incrementa el volumen, consecuentemente, el nivel del líquido incrementará causando que el transmisor de presión diferencial indique un nivel más bajo que el nivel actual. En las calderas para la medición de nivel del domo se asume una densidad constante del agua, sin embargo la mayoría de fabricantes están incorporando sensores de temperatura en los transmisores que compensen por las variaciones.

Cálculo de valores de calibración para el transmisor que será colocado en tanque abierto:

$$\text{Span} = A * G$$

$$\text{Rango bajo} = S * G$$

$$\text{Rango alto} = (S * G) + (A * G)$$

Donde:

A = altura máxima del nivel (m)

S = altura entre la conexión del transmisor y el nivel mínimo a medir (m)

G = gravedad específica del fluido (adimensional)

Cálculo de valores de calibración para tanque cerrado:

$$\text{Span} = A * G_t$$

$$\text{Rango bajo} = (S * G_t) - (E * G_s)$$

$$\text{Rango alto} = (A + S) G_t - (E * G_s)$$

donde:

A = altura máxima de nivel (m)

S = altura entre la conexión del transmisor y el nivel mínimo a medir (m)

Gt = Gravedad específica del líquido en el tanque (adimensional)

Gs = Gravedad específica del líquido en la pierna (adimensional)

E = altura de la pierna (m)

Los transmisores electrónicos de presión diferencial utilizados en la medición de nivel de caldera permiten la modificación del *span* (diferencia entre el mínimo y máximo valor que el transmisor puede medir y a la que su salida será proporcional). Las fórmulas anteriores permiten determinar estos valores, en la siguiente sección se describe el procedimiento para la calibración.

### **5.6.3 Aplicaciones en calderas**

Los transmisores de presión diferencial son utilizados casi generalmente en la medición de nivel del domo de caldera, para la medición se debe tomar en cuenta que el domo es un tanque cerrado y que el vapor es un fluido que condensa. Por lo tanto debe hacerse la medición con pierna húmeda según se vio en la sección anterior.

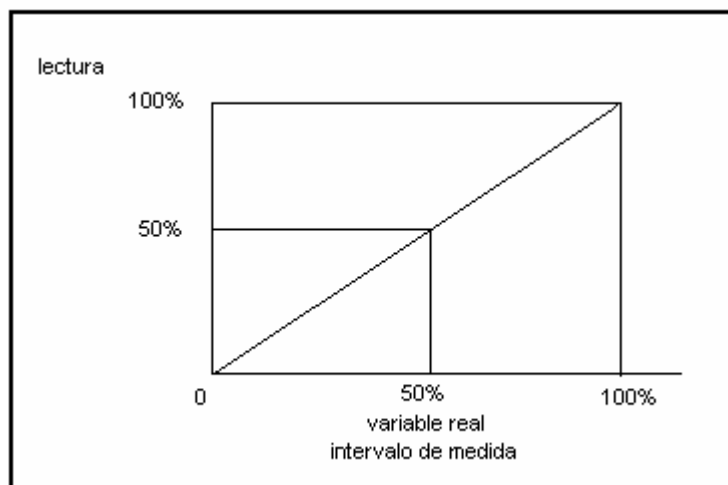
## **5.7 Calibración y ajuste**

Como todos los instrumentos de medición los transmisores requieren una calibración cuya frecuencia depende de la aplicación específica y de las características propias del transmisor.

Un instrumento se considera que está bien calibrado cuando en todos los puntos de su campo de medida, la diferencia entre el valor real de la variable y el valor indicado, registrado o transmitido, está comprendida entre los límites determinados por la precisión dada por el fabricante.

En un instrumento ideal, es decir sin error, la relación entre los valores reales de la variable comprendidos dentro del campo de medida, y los valores de la lectura del instrumento, es lineal. Figura 62.

**Figura 62. Instrumento ideal**

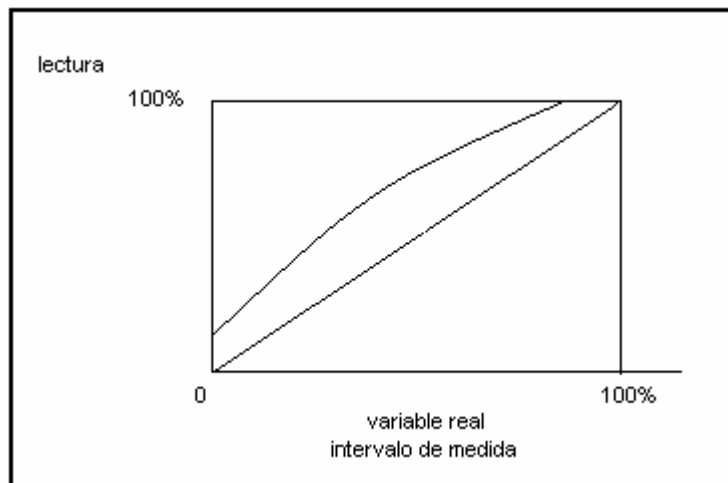


En particular si el transmisor es electrónico cuando la variable toma los valores 0, 50 ó 100%, las señales de salida serían 4, 12 y 20 mA c.c. respectivamente.

En condiciones de funcionamiento estático, las desviaciones respecto a la relación lineal indicada, dan lugar a los errores de calibración de los instrumentos, suponiendo que estas desviaciones no superan la exactitud dada por el fabricante del instrumento, ya que en este caso se considera el instrumento calibrado aunque no coincida exactamente la curva variable-lectura del instrumento con la recta ideal.

Las desviaciones de la curva variable real-lectura de un instrumento típico tal como el de la figura 63 con relación a la recta ideal representan los errores de medida del aparato.

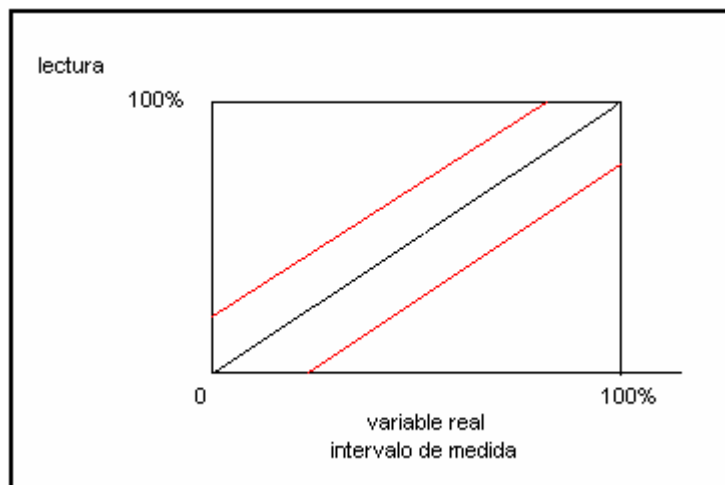
**Figura 63. Instrumento descalibrado**



La curva anterior puede descomponerse en tres que representan individualmente los tres tipos de errores que pueden hallarse en forma aislada o combinada en los instrumentos:

**Error de cero:** todas las lecturas están desplazadas un mismo valor con relación a la recta representativa del instrumento. Este tipo de error puede verse en la figura 64 en la que se observa que el desplazamiento puede ser positivo o negativo. El punto de partida o de base de la recta representativa cambia sin que varíe la inclinación o la forma de la curva.

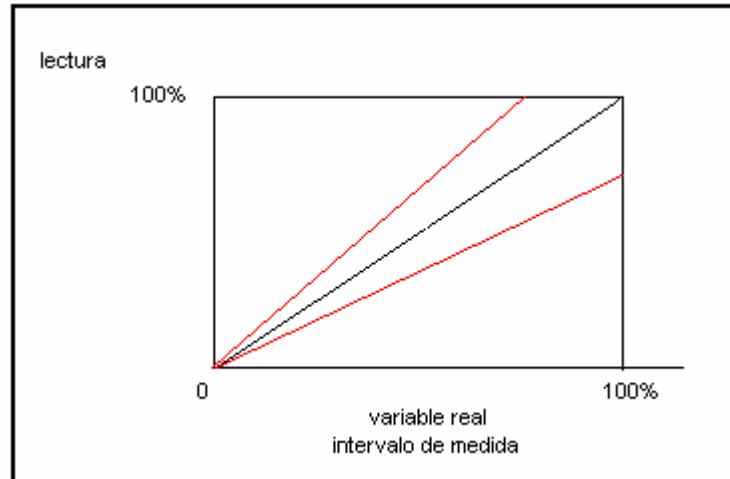
**Figura 64. Error de cero**



**Error de multiplicación:** todas las lecturas aumentan o disminuyen progresivamente con relación a la recta representativa, según puede verse en la figura 65 en la que se observará que el punto base no cambia y que la desviación progresiva puede ser positiva o negativa.

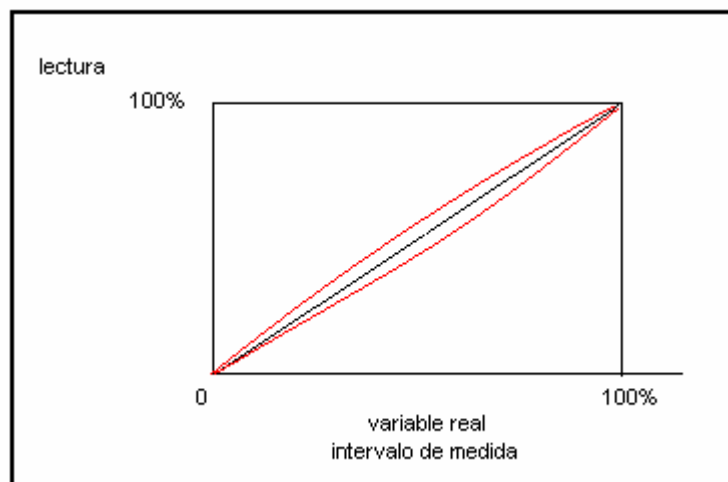


**Figura 65. Error de multiplicación**



**Error de angularidad:** la curva real coincide con los puntos 0 y 100% de la recta representativa, pero se aparta de la misma en los restantes. En la figura 66 puede verse un error de este tipo. El máximo de la desviación suele estar hacia la mitad de la escala.

**Figura 66. Error de angularidad**



Los instrumentos pueden ajustarse para corregir estos errores, si bien hay que señalar que algunos instrumentos, por su tipo de construcción no pueden tener error de angularidad. La combinación de estos tres errores da lugar a una curva de relación medida real-lectura, como la representada en la figura 63.

En general, el error de cero se corrige con el llamado *botón o tornillo de cero*.

El error de multiplicación se corrige actuando sobre el tornillo de multiplicación o *span*.

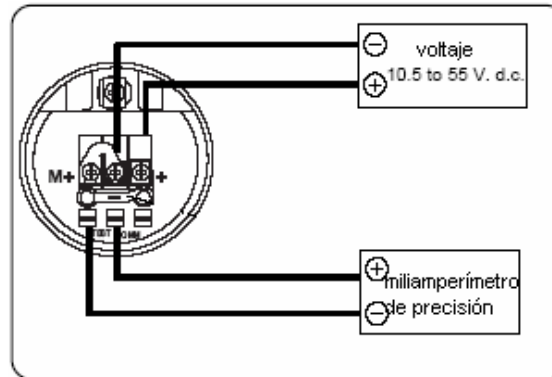
No obstante existen varios métodos para calibrar un transmisor y la elección depende de factores como la tecnología y herramientas disponibles, la capacidad del transmisor para aceptar uno u otro método.

Describiremos el procedimiento para calibrar y ajustar un transmisor de presión con salida analógica de 4-20 mA.

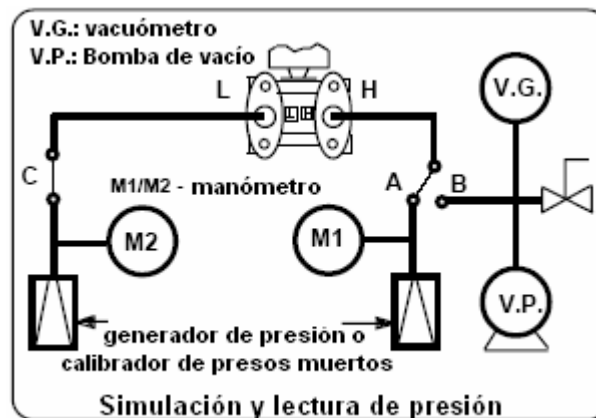
El proceso para calibrar un transmisor de presión con salida analógica de 4-20 mA consiste en simular valores conocidos de presión y comparar la salida leída en un amperímetro de precisión con la salida esperada según la presión inyectada en la entrada del transmisor la cual es leída con un manómetro de precisión, un vacuometro o un calibrador de pesos muertos.

El ajuste se realiza girando los tornillos o presionando los botones de cero y/o *span* según el diseño. (Figuras 67-69).

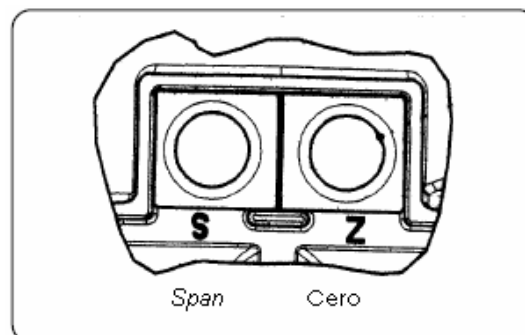
**Figura 67. Conexiones eléctricas para la calibración**



**Figura 68. Simulación y lectura de presión**



**Figura 69. Botones de ajuste**



El procedimiento descrito es el utilizado generalmente para calibrar y ajustar (los que admiten ajuste) los instrumentos de campo, las variaciones serían la variable simulada y la salida medida.

## CONCLUSIONES

1. El control automático facilita las tareas que en un principio se hacían manualmente, y actualmente es posible el control de la mayor parte de variables que surgen en el campo industrial.
2. Los fabricantes de instrumentos para el control de procesos día a día aumentan y mejoran las capacidades de los equipos y sistemas para el control de calderas.
3. La selección de los instrumentos deberá realizarse tomando en cuenta factores como calidad esperada del proceso, eficiencia objetivo, capacidad de la caldera, condiciones de operación, variaciones de carga, etc.,
4. Generalmente, el proveedor juega un papel importante en la elección debido a su experiencia.
5. Muchas veces puede relegarse la implementación de un sistema de control en una caldera excusando factores económicos, sin embargo, al considerarse todas las variables involucradas puede calcularse un retorno de inversión y un ahorro considerables.
6. Los transmisores de presión pueden utilizarse satisfactoriamente en la medición de nivel y en las calderas encuentran una basta aplicación.



## RECOMENDACIONES

1. El involucrado en la selección de instrumentos de control de calderas deberá tomar en cuenta los factores involucrados en la aplicación específica.
2. El ingeniero debe estar al día en cuanto a las nuevas tecnologías de la instrumentación en general, ya que constantemente surgen opciones que ayudan a mejorar la cantidad y calidad de los procesos de producción.
3. El sitio web <http://www.micmod.com/boiler.htm> contiene un programa para el cálculo del retorno de la inversión al implementar un control de combustión para una caldera que incluya un análisis de Oxígeno. El programa fue creado por un fabricante de equipo para control de calderas y considera diversas variantes para apropiarlo a nuestra aplicación.
4. Los transmisores de presión diferencial tienen otras importantes aplicaciones como medición de flujo, medición de densidad de un líquido en un tanque, etc. Puede consultarse la bibliografía proporcionada para conocer más de estos útiles instrumentos.
5. El estudiante deberá aprovechar las visitas técnicas habituales y determinar por simple observación las múltiples ventajas de los procesos de producción automáticos sobre los manuales.





## BIBLIOGRAFÍA

1. Cerezo Toledo, David Ricardo. Propuesta de una práctica experimental de control automático del proceso de transferencia de calor en el intercambiador de tubos concéntricos del laboratorio de operaciones unitarias en la universidad de San Carlos. Trabajo de graduación Ing. Quím. Guatemala, universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2005. 145 pp.
2. Basic Operation and function of control valves. Estados Unidos: Cashco, 1999, 65 pp.
3. Creus Solé, Antonio. **Instrumentación industrial**. 6ta. Edición. México: editorial Alfaomega , 1998. 750 PP.
4. Desing of fluid system. 12va. Edición. Estados Unidos: Copyright by Spirax Sarco, 2000. 154 pp.
5. Hart Comunication. s.l. Samson, 1999. 40 pp.
6. Profibus PA . s.l. Samson, 1999. 40 pp
7. Steampack Boiler Control Premier. Micromod Automation. Estados Unidos 2005. 22 pp.
8. Steam utilization. Estados Unidos: Copyright by Spirax Sarco, 2000. 66 pp.
9. Terminology and simbols in control Engineering. s.l. Samson, 2000. 28 pp.