



Universidad Laica “Eloy Alfaro de Manabí”

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Eléctrica

Tesis de Grado

Previo a la obtención del Título de

INGENIERO ELECTRICO

TEMA:

“Control y Protección de una Caldera, aplicando Instrumentación de Campo y

Calibración de instrumentos”

AUTOR

Cadena Párraga Adolfo Rolando

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Raúl Villavicencio Mejía.

Manta

Manabí

Ecuador

2012 - 2013

CERTIFICACIÓN

En calidad de Director de Tesis.

CERTIFICO que el presente Proyecto de grado titulado:

“Control y Protección de una Caldera, aplicando Instrumentación de Campo y Calibración de instrumentos”

Ha sido desarrollado en su totalidad por el Egresado **CADENA PÁRRAGA ADOLFO** , bajo mi supervisión y dirección, de acuerdo a los reglamentos internos de graduación, como requerimiento previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico.

Ing. Raúl Villavicencio Mejía.

DIRECTOR DE TESIS

AGRADECIMIENTO.

En el proceso de formación y aprendizaje de los valores esenciales, se encuentra con muchos obstáculos, pero también se encuentra con valiosas personas que a uno le brindan el apoyo en diferentes etapas de la vida. Son motivo en la que me siento agradecido.

A **DIOS** por permitir conseguir logros importantes y cada día más fortalecer la unión y el amor a mi familia.

A mis padres José Luis Cadena, Piedad Párraga, a mi padre de corazón Marcelo Alay, a quienes les debo infinitamente la existencia de mi vida, quienes me inculcaron los primeros valores, como el respeto y la responsabilidad y sobre todo esas ganas fervientes de alegría.

Y en especial a la persona que con quien he conocido el verdadero significado del amor, esperanza y entrega, ella es mi amada **COMPAÑÍA DE JESUS**, los cuales me inculcaron el valor del sacrificio, entrega desinteresada al servicio al prójimo, los cuales me dieron la vida, y sobre todo por haberme brindado su apoyo en los peores momentos, que con sus consejos de amor y el apoyo incondicional, ha sido posible lograr esta meta muy importante en mi vida.

A la Universidad, Facultad de Ingeniería, y en especial a los catedráticos de Ingeniería Eléctrica, que con sus conocimientos nos dan la oportunidad de ser un profesional, y poder servir a la sociedad.

DEDICATORIA

A la autora de mis días mujer sencilla y de expresiones alegres, que con sus principios y enseñanzas me brindo las lecciones más importantes de mi vida, con ella aprendí la esencia de los valores como el amor, el respeto, la responsabilidad y por sobre todo el ejemplo de la lucha constante por superarme, es mi madre la verdadera inspiración y responsable de los éxitos en mi vida, a ella especialmente dedico este trabajo.

A mi padre, su ejemplo de trabajo, tenacidad, perseverancia y constancia, siempre me ha inspirado.

*A mí amada **COMPAÑÍA DE JESUS (JESUITAS)**, por ser la razón esencial de mi existencia que impulsaron en cada momento mis ideales de superación.*

DECLARATORIA

La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta Tesis son exclusivamente de los Autores, y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado corresponderá a la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí.

Cadena Párraga Adolfo R.



ESCUELA DE INGENIERIA ELÉCTRICA.

Los miembros del tribunal examinador aprueban el informe y proyecto de la investigación sobre **“Control y Protección de una Caldera, aplicando Instrumentación de Campo y Calibración de instrumentos”** a él Egresado Sr. Cadena Párraga Adolfo R. Luego de haber sido analizado por los Señores miembros del Tribunal de Grado de la Facultad de Ingeniería, y en cumplimiento de lo que establece la Ley se da por Aprobada. Para constancia firman:

MIEMBROS DEL TRIBUNAL

NOTAS DE CALIFICACION

TEMA:

**“Control y Protección de una Caldera, aplicando
Instrumentación de Campo y Calibración de
Instrumentos”**

RESUMEN DEL PROYECTO

El presente tema hace referencia al diseño e implementación de un Proyecto Científico denominado:

“Control y Protección de una Caldera, aplicando Instrumentación de Campo y Calibración de instrumentos”

Que aporte a los compañeros estudiantes de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, una base metodológica aplicando Investigación Científica, de una herramienta sólida, identificar la función primordial que cumplen los dispositivos de Mecatrónica, Instrumentación Industrial, Automatización y Control Industrial, Control Adaptivo y Predictivo, Redes Industriales, Protocolos de Comunicación Industrial y Sistema de Control en tiempo continuo.

De igual forma se busca familiarizar a los estudiantes y a las personas que tengan contacto con el proyecto con las características principales de los diferentes elementos de control como Transmisores, Válvulas de Control y Sensores; lograr un nivel avanzado de conocimientos y familiarizándose con la Instrumentación Industrial, las Normas Industriales Eléctricas, de Control, Procesos Industriales, Seguridad Industrial, etc.

INDICE

Introducción.

1. Identificación del Problema.

1.1. Descripción del Problema.

1.2. Planteamiento del Problema.

1.3. Formulación del Problema.

2. Antecedentes.

3. Objetivos.

3.1. Objetivo General.

3.2. Objetivo Específicos.

4. Delimitación del Problema.

4.1. Delimitación Conceptual.

4.2. Relación con el Tiempo.

4.3. Delimitación del Universo del Problema.

5. Justificación.

6. Marco Teórico.

6.1. Instrumentación industrial.

6.1.1. Clases de instrumentos.

6.1.2. En función del instrumento.

6.1.3. En función de la variable de proceso.

6.1.4. Código de identificación de instrumentos

6.2. Transmisores.

6.2.1. Introducción.

6.2.2. Transmisores neumáticos.

6.2.2.1 Bloque amplificador de dos etapas.

6.2.2.2 Transmisor de equilibrio de movimientos.

6.2.2.3 Transmisor de equilibrio de fuerzas.

6.2.2.4 Transmisor de equilibrio de momentos.

6.2.3. Transmisores electrónicos.

6.2.3.1. Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas.

6.2.3.2. Detector de posición de inductancia.

6.2.3.3. Transformador diferencial.

6.2.4. Transmisores digitales.

6.2.5. Comunicaciones.

6.2.6. Comparación de transmisores

6.3. Medidas de caudal

6.3.1. Medidores volumétricos.

6.3.1.1. Instrumentos de presión diferencial.

6.3.1.1.1. Fórmula general.

6.3.1.1.2. Elementos de presión diferencial.

6.3.1.1.3. Tubo Pitot.

6.3.1.1.4. Tubo Annubar.

- 6.3.1.1.5. Transmisores de fuelle y de diafragma.
- 6.3.1.1.6. Integradores
- 6.3.1.2. Área variable (rotámetros).
- 6.3.1.3. Velocidad
 - 6.3.1.3.1. Vertederos y Venturi.
 - 6.3.1.3.2. Turbinas.
 - 6.3.1.3.3. Transductores ultrasónicos
- 6.3.1.4. Fuerza (medidor de placa).
- 6.3.1.5. Tensión inducida (medidor magnético).
 - 6.3.1.5.1. Medidor magnético de caudal.
- 6.3.1.6. Desplazamiento positivo.
 - 6.3.1.6.1. Medidor de disco oscilante.
 - 6.3.1.6.2. Medidor de pistón oscilante.
 - 6.3.1.6.3. Medidor de pistón alternativo.
 - 6.3.1.6.4. Medidor rotativo.
 - 6.3.1.6.5. Medidor de paredes deformables.
 - 6.3.1.6.6. Accesorios.
 - 6.3.1.6.7. Torbellino y Vórtex.
 - 6.3.1.6.8. Oscilante.

6.3.2. Medidores de caudal masa.

6.3.2.1. Compensación de variaciones de densidad del fluido en medidores volumétricos.

6.3.2.2. Medición directa del caudal-masa

6.3.2.2.1. Medidores térmicos de caudal.

6.3.2.2.2. Medidor de Coriolis.

6.3.2.3. Comparación de características de los medidores de caudal.

6.4. Medición de nivel

6.4.1. Medidores de nivel de líquidos.

6.4.1.1. Instrumentos de medida directa.

6.4.1.2. Instrumentos basados en la presión hidrostática. Medidor manométrico. Membrana. Burbujeo. Presión diferencial.

6.4.1.3. Instrumento basado en el desplazamiento.

6.4.2. Medidores de nivel de sólidos.

6.4.2.1. Detectores de nivel de punto fijo.

6.4.2.2. Detectores de nivel continuos.

6.5. Otras Variables.

6.5.1. Variables químicas

6.5.1.1. Conductividad.

6.5.1.2. pH.

6.5.1.3. Redox (potencial de oxidación-reducción).

6.5.1.4. Concentración de gases.

6.5.1.5. Conductividad térmica.

6.5.1.6. Paramagnetismo del oxígeno.

6.5.1.7. Analizador de infrarrojos.

6.6. Elementos finales de control.

6.6.1. Válvulas de control.

6.6.1.1. Generalidades.

6.6.1.2. Tipos de válvulas.

6.6.1.2.1. Válvula de globo.

6.6.1.2.2. Válvula en ángulo.

6.6.1.2.3. Válvula de tres vías.

6.6.1.2.4. Válvula de jaula.

6.6.1.2.5. Válvula de compuerta.

6.6.1.2.6. Válvula en y.

6.6.1.2.7. Válvula de cuerpo partido.

6.6.1.2.8. Válvula Saunders.

6.6.1.2.9. Válvula de compresión.

6.6.1.2.10. Válvula de obturador excéntrico rotativo.

6.6.1.2.11. Válvula de obturador cilíndrico excéntrico.

6.6.1.2.12. Válvula de mariposa.

6.6.1.2.13. Válvula de bola.

- 6.6.1.2.14. Válvula de orificio ajustable.
- 6.6.1.2.15. Válvula de flujo axial.
- 6.6.1.3. Cuerpo de la válvula.
- 6.6.1.4. Tapa de la válvula.
- 6.6.1.5. Partes internas de la válvula. Obturador y asientos
 - 6.6.1.5.1. Generalidades.
 - 6.6.1.5.2. Materiales.
 - 6.6.1.5.3. Características de caudal inherente.
 - 6.6.1.5.4. Características de caudal efectivas.
 - 6.6.1.5.5. Selección de la característica de la válvula.
- 6.6.1.6. Corrosión y erosión en las válvulas. Materiales.
- 6.6.1.7. Servomotores.
 - 6.6.1.7.1. Servomotor neumático.
 - 6.6.1.7.2. Servomotor eléctrico.
 - 6.6.1.7.3. Tipos de acciones en las válvulas de control.
- 6.6.1.8. Accesorios.
 - 6.6.1.8.1. Camisa de calefacción.
 - 6.6.1.8.2. Posicionador.
 - 6.6.1.8.3. Volante de accionamiento manual.
 - 6.6.1.8.4. Repetidor.
 - 6.6.1.8.5. Transmisores de posición y microinterruptores de final de carrera.

- 6.6.1.8.6. Válvula de solenoide de tres vías.
- 6.6.1.8.7. Válvula de enclavamiento.
- 6.6.1.8.8. Válvula de K_v o C_v . o carrera ajustables.
- 6.6.1.9. Dimensionamiento de la válvula. Coeficientes K_v y C_v .
 - 6.6.1.9.1. Definiciones.
 - 6.6.1.9.2. Fórmula general.
 - 6.6.1.9.3. Líquidos.
 - 6.6.1.9.4. Gases.
 - 6.6.1.9.5. Vapores.
 - 6.6.1.9.6. Régimen bifásico.
 - 6.6.1.9.7. Resumen de cálculo de coeficientes de válvulas.
- 6.6.1.10. Ruido en las válvulas de control.
 - 6.6.1.10.1. Generalidades.
 - 6.6.1.10.2. Causas del ruido en las válvulas.
 - 6.6.1.10.3. Reducción del ruido.
- 6.6.2. Elementos finales electrónicos.
 - 6.6.2.1. Amplificador magnético saturable.
 - 6.6.2.2. Rectificadores controlados de silicio.
 - 6.6.2.3. Válvula inteligente.
- 6.6.3. Otros elementos finales de control.

6.7.Regulación automática

- 6.7.1. Introducción.
- 6.7.2. Características del proceso.
- 6.7.3. Sistemas de controles neumáticos y eléctricos.
 - 6.7.3.1.Control todo-nada.
 - 6.7.3.2.Control flotante.
 - 6.7.3.3.Control proporcional de tiempo variable.
 - 6.7.3.4.Control proporcional.
 - 6.7.3.5.Control proporcional + integral.
 - 6.7.3.6.Control Proporcional + derivado.
 - 6.7.3.7.Control proporcional + integral + derivado.
 - 6.7.3.8.Cambio automático-manual-automático.
 - 6.7.3.9.Tendencias en los instrumentos neumáticos
- 6.7.4. Sistemas de controles electrónicos y digitales.
 - 6.7.4.1.Generalidades.
 - 6.7.4.2.Control todo-nada.
 - 6.7.4.3.Control proporcional de tiempo variable.
 - 6.7.4.4.Control proporcional.
 - 6.7.4.5.Control integral.
 - 6.7.4.6.Control derivativo.
 - 6.7.4.7.Control proporcional + integral + derivativo.

6.7.4.8.Cambio automático-manual-automático.

6.7.4.9.Controladores digitales.

6.7.5. Selección del sistema de control.

6.7.6. Criterios de estabilidad en el control.

6.7.7. Métodos de ajuste de controladores.

6.7.8. Otros tipos de control.

6.7.8.1.Control en cascada.

6.7.8.2.Programadores.

6.7.8.3.Control de relación.

6.7.8.4.Control anticipativo.

6.7.8.5.Control de gama partida.

6.7.8.6.Control selectivo.

6.7.8.7.Control de procesos discontinuos.

6.7.8.8.Controladores no lineales.

6.7.8.9.Instrumentos auxiliares

6.8.Calibración de los instrumentos

6.8.1. Introducción.

6.8.2. Errores de los instrumentos. Procedimiento general de calibración.

6.8.3. Calibración de instrumentos de presión, nivel y caudal.

6.8.4. Calibración de instrumentos de temperatura.

6.8.5. Comprobación de válvulas de control.

6.8.6. Aparatos electrónicos de comprobación.

6.8.7. Calidad de calibración según Norma ISO 9002.

7. Prácticas.

7.1. Esquemas típicos de control.

7.2. Calderas de vapor.

7.2.1. Control de combustión.

7.2.2. Control de nivel.

7.2.3. Seguridad de llama.

7.2.4. Secaderos y evaporadores.

7.2.5. Horno túnel.

7.2.6. Columnas de destilación.

7.2.7. Intercambiadores de calor.

7.2.8. Control del reactor en una central nuclear.

7.3. Transmisores y Protocolos de comunicación.

7.4. Medidores de caudal y Flujo.

8. Conclusiones.

9. Bibliografía.

10. Anexos.

Introducción.

El presente tema hace referencia a una investigación que centra su objeto de estudio en el: **“Control y Protección de una Caldera, aplicando Instrumentación de Campo y Calibración de instrumentos”**

El propósito es dar a conocer los fundamentos y los elementos básicos que configuran el presente trabajo. De tal manera que se comienza identificando el problema para así realizar el planteamiento y la formulación del mismo; establecer los objetivos generales de la Investigación, recurriendo a la copia documental, tratamiento y análisis de la información y la elaboración conceptual que relaciona procedimientos prácticos y teóricos del campo investigativo.

Las razones que se argumentan en la presente indagación son el resultado de un trabajo personalizado que pretende verificar y aportar aspectos teóricos e experimentales, con la finalidad de aportar conocimiento Científico; promoviendo la Investigación Científica y el Desarrollo del Pensamiento, por lo tanto, las razones que sustentan la investigación se fundamentan en la utilización de Instrumentos y Modelos Investigativos.

1. Identificación del Problema.

1.1.Descripción del Problema.

Actualmente la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, no cuenta con los elementos y equipos suficientes para la elaboración de un Laboratorio de Investigación Científica en las áreas de Instrumentación Industrial y Control de Procesos, que permita realizar prácticas a nivel Profesional y que genere conocimientos sólidos en las tecnologías de Procesos Industriales de vanguardia a nivel industrial técnico, tal como lo es la Automatización y Control Industrial, Instrumentación Industrial e Instrumentación Virtual. La falta de Laboratorios de Instrumentación Industrial con tecnologías de punta y de uso industrial, genera vacíos de conocimiento y por lo tanto una serie de desconocimientos, con lo que conlleva a la no asimilación de Información técnica a los estudiantes de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí. Otro problema que radica es el avance inconmensurable de la Electrónica de Control y dispositivos tecnológicos tanto de medición de multivariantes, como metrológicos los cuales año tras año evolucionan, creando una atmósfera de competitividad con el entorno. Las necesidades de las Industrias generadas tanto de Generación Eléctrica, Manufactura, Pesquera, Petrolera, Química, de Procesos Industriales e Insumos y demás generadas por la Automatización, Control Industrial e Instrumentación son conocidas por su avance tecnológico, con lo cual hace que la falta de estos Laboratorios afecte directamente a Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí.

1.2.Planteamiento del Problema.

El presente tema expone cómo diseñar una investigación del **“Control y Protección de una Caldera, aplicando Instrumentación de Campo y Calibración de instrumentos”**

El entrenamiento consiste en elaborar una serie de prácticas que ayuden a los estudiantes de Ingeniería Eléctrica a desempeñarse con eficacia y eficiencia, el funcionamiento de componentes de Instrumentación de Campo, tales como lo son los Sensores, Transmisores, Válvulas y Elementos Finales de Control Industriales buscando un mayor conocimiento en Control Industrial e Instrumentación Virtual, materias altamente apreciadas en el entorno industrial.

Para lo cual se debe de realizar prácticas avanzadas como medición y control de variables tales como: Medidas de caudal y Flujo, los diferentes transmisores, protocolos de Comunicación Industrial, y los diferentes modelos de regulaciones automáticas, etc.

1.3. Formulación del problema.

¿Cómo diseñar un guía de aprendizaje para el **“Control y Protección de una Caldera, aplicando Instrumentación de Campo y Calibración de instrumentos”**.

La interrogante requiere de manera preferente que se describa el problema en los siguientes términos:

La mayoría de la Industria Ecuatoriana está sujeta a Automatización, Control e Instrumentación Industrial, Comunicaciones Industriales con sus diferentes protocolos de información y recepción de señales, todo esto con lleva a optimizar Procesos de Producción en el Campo Industrial, que de acuerdo con las observaciones de Estándares de Calidad, se pueda explicar y exponer el valor práctico de la presente Investigación.

2. Antecedentes.


Desde sus inicios en la ciudad de Manta, la provincia de Manabí y la Industria Ecuatoriana en general, han promovido la Instrumentación Industrial, la Facultad de Ingeniería y la Escuela de Ingeniería Eléctrica ha venido dotando poco a poco sus Laboratorios con los equipos básicos necesarios, con la ayuda primordial de sus Autoridades, Directivos, y la de sus estudiantes, con lo cual se esta cumpliendo con el objetivo de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, ser el ente y nexo que permitan el desarrollo Integral y Científico de la Escuela de Ingeniería Eléctrica. Para el desarrollo de las prácticas, el Laboratorio de Ingeniería Eléctrica cuenta con equipos como Osciloscopios, Generadores de señal, Fuentes de alimentación, Multímetros, Computadores, Equipos de Automatización Industrial, PLC, al igual que numerosos proyectos de clases realizados y dotados por los egresados y estudiantes que de una u otro manera han potenciado el desarrollo intelectual del estudiantado.


3. Objetivos.

3.1.Objetivo General.

 Como diseñar una guía de aprendizaje para el **“Control y Protección de una Caldera, aplicando Instrumentación de Campo y Calibración de instrumentos”**, que permita conocer y utilizar las características de estos dispositivos, para realizar prácticas de Medición y Control de Nivel, Flujo y Caudal, de las diferentes variables de medición Industrial, de Transmisores y Protocolos de Comunicación, del uso de Válvulas y dispositivos de control, para el desarrollo de competencias en el área de Instrumentación en los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí.

3.2.Objetivos específicos.

 Diseñar e implementar una herramienta de análisis y desarrollo de aplicaciones industriales, basada en la Instrumentación tanto Industrial, como Virtual, con sus respectivas Normas de Control de Calidad y Calibración de Instrumentos basados en la norma ISO 9002.

 Diseñar e Editar la guía de ejemplos y prácticas propuestas para estudiantes que ayude a la correcta implementación de cada una de ellas.

4. Delimitación.

4.1. Delimitación conceptual.

Para este proyecto se encuentran involucradas diferentes ramas de la carrera tales como: Instrumentación Industrial, Procesos Industriales, Mecatrónica, Neumática y la primordial Automatización y Control Industrial.

Para el área de Instrumentación se tienen en cuenta los conceptos de acondicionamiento y recepción de señal de los Sensores y Actuadores, los diferentes transmisores y captadores de señal, utilizados durante las prácticas de aplicación Industrial

Para el área de Mecatrónica y Neumática los diferentes parámetros de una línea de ensamble industrial, Accionamientos, control, válvulas de control y empleo de diferentes técnicas, por medio de la acción neumática e hidráulica de sus diferentes dispositivos de ejecución.

Para el Área de Automatización Industrial, las prácticas Industriales se desarrollaron en manipulación de sistemas de eventos discretos y análogos informando el estado del proceso industrial para maniobrar, controlar y/o señalar procesos simulados en la planta piloto.

4.2.Relación con el tiempo.

El desarrollo de este proyecto se realizó en un tiempo aproximado de 5 meses, y las actividades están claramente especificadas en el cronograma de trabajo entregado en el anteproyecto previamente aprobado por la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí.

En ese tiempo fueron utilizados todos los recursos para la selección de las mejores prácticas que generen al estudiante destreza en esta área de forma rápida.

4.3.Delimitación del universo de la investigación.

Este proyecto tiene como entorno de Aplicación a la Escuela de Ingeniería Eléctrica, de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, para el desarrollo de diferentes proyectos de índole científico.

5. Justificación.

Los instrumentos de control están universalmente aceptados. En la industria se presenta repetidamente, la necesidad de conocer y entender el funcionamiento de los instrumentos y el papel que juegan dentro del control del proceso. En la sociedad tecnológica en la que vivimos, son cada vez más altas las necesidades de la Ciencia y la Tecnología, con lo cual, nos exige una constante búsqueda de conocimientos científicos. Es evidente que las ramas tecnológicas como la Instrumentación y Control Industrial, ejercieron un impacto a nivel global, tanto en el desarrollo socio-económico como en el industrial. Tanto la Automatización y la Electrónica Instrumental de a poco están acaparando el mercado industrial, gracias a su eficacia y eficiencia, con llevando a la industria con su innovación a ser automática y versátil, sin incurrir al desgaste humano.

El presente trabajo Investigativo tiene como finalidad, contribuir con conocimientos que le brinda una mano, a los estudiantes al mundo de la Instrumentación y Control Industrial, conocimiento que será clave en el desarrollo tecnológico en muchas industrias dentro y fuera del país.

ESTRATEGIA METODOLÓGICA.

Para alcanzar los objetivos de este proyecto, se hizo uso de la investigación aplicada y el método que se siguió fue experimental.

Las etapas del proyecto son las siguientes:

- ✚ Se recopiló y estudió el material bibliográfico y de software de programación relevante al proyecto.
- ✚ Se determinaron los temas específicos de cada una de las prácticas.
- ✚ La siguiente etapa consistió en el diseño, construcción del módulo de calibración y la Instrumentación de Campo que son utilizados para las prácticas.
- ✚ Se implementaron las prácticas y se hicieron pruebas de desempeño con el fin de validar el correcto funcionamiento.

Para facilidad de comprensión y aplicación, basándonos en la secuencia lógica de aprendizaje, el laboratorio de programación y aplicación industrial de módulo de calibración se desarrolló en dos etapas. La ejecución secuencial de cada una de estas etapas está definida dentro de las Prácticas y depende exclusivamente del grado de conocimiento de él (los) estudiante(s) que se disponga(n) a realizar prácticas en el laboratorio.

Etapas del laboratorio:

✚ Etapa de reconocimiento de equipos y materiales.

✚ Etapa de programación y aplicación industrial.

1. Etapa de reconocimiento de equipos y materiales.

La ejecución de esta etapa tiene como objetivo familiarizar a los estudiantes que se disponen a realizar las prácticas, con los equipos y materiales que son utilizados a lo largo del laboratorio e interioriza la importancia del uso adecuado para prevenir daños.

2. Etapa de programación y aplicación industrial.

La ejecución de esta etapa tiene como objetivo generar destreza a los estudiantes en la configuración, programación y aplicación de la calibración de Sensores y actuadores, utilizando herramientas de campo.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.1. Introducción a la Instrumentación Industrial.

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

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

(1) “Los instrumentos de medición y control permiten el mantenimiento y la regulación de estas constantes en condiciones más idóneas que las que el propio operador podría realizar. En los inicios de la era industrial, el operario llevaba a cabo un control manual de estas variables utilizando solo instrumentos simples, manómetros, termómetros, válvulas manuales, etc., control que era suficiente por la relativa simplicidad de los procesos. Sin embargo, la gradual complejidad con que éstos se han ido desarrollando ha exigido su automatización progresiva por medio de los instrumentos de medición y control”. Estos instrumentos han ido liberando al operario de su función de actuación física directa en la planta y al mismo tiempo, le han permitido una labor única de supervisión y de vigilancia del proceso desde centros de control situados en el propio proceso o bien en salas aisladas separadas; asimismo, gracias a los instrumentos ha sido posible fabricar productos complejos en condiciones estables de calidad y de

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

características, condiciones que al operario le serían imposibles o muy difíciles de conseguir, realizando exclusivamente un control manual. Los procesos industriales a controlar pueden dividirse ampliamente en dos categorías: procesos continuos y procesos discontinuos. En ambos tipos, deben mantenerse en general las variables (presión, caudal, nivel, temperatura, etc.), bien en un valor deseado fijo, bien en un valor variable con el tiempo de acuerdo con una relación predeterminada, o bien guardando una relación determinada con otra variable.

6.1.1 Clases de instrumentos.

(2) “Los instrumentos de medición y de control son relativamente complejos y su función puede comprenderse bien si están incluidos dentro de una clasificación adecuada. Como es lógico, pueden existir varias formas para clasificar los instrumentos, cada una de ellas con sus propias ventajas y limitaciones. Se considerarán dos clasificaciones básicas: la primera relacionada con la función del instrumento y la segunda con la variable del proceso”.

6.1.2. En función del instrumento.

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

Instrumentos ciegos (fig. 1.1), son aquellos que no tienen indicación visible de la variable. Hay que hacer notar que son ciegos los instrumentos de alarma, tales como presostatos y termostatos (interruptores de presión y temperatura respectivamente) que poseen una escala exterior con un índice de selección de la variable, ya que sólo ajustan el punto de disparo del interruptor o conmutador al cruzar la variable el valor

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

seleccionado. Son también instrumentos ciegos, los transmisores de caudal, presión, nivel y temperatura sin indicación.



(fig. 1.1)

Los **instrumentos indicadores** (fig. 1.2) disponen de un índice y de una escala graduada en la que puede leerse el valor de la variable. Según la amplitud de la escala se dividen en indicadores concéntricos y excéntricos. Existen también indicadores digitales que muestran la variable en forma numérica con dígitos.



(fig. 1.2)

Los **instrumentos registradores** (fig. 1.3) registran con trazo continuo o a puntos la variable, y pueden ser circulares o de gráfico rectangular o alargado según sea la forma del gráfico. Los registradores de gráfico circular suelen tener el gráfico de 1 revolución en 24 horas mientras que en los de gráfico rectangular la velocidad normal del gráfico es de unos 20 mm/hora.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO



(fig. 1.3)

(3) “Los **elementos primarios de control** (fig. 1.4) están en contacto con la variable y utilizan o absorben energía del medio controlado para dar al sistema de medición una indicación en respuesta a la variación de la variable controlada. El efecto producido por el elemento primario puede ser un cambio de presión, fuerza, posición, medida eléctrica, etc.”



(fig. 1.4)

Por ejemplo: en los elementos primarios de temperatura de bulbo y capilar, el efecto es la variación de presión del fluido que los llena y en los de termopar se presenta una variación de fuerza electromotriz.

Los **transmisores** (fig. 1.5) captan la variable de proceso a través del elemento primario y la transmiten a distancia en forma de señal neumática de margen 3 a 15 psi (libras por pulgada cuadrada) o electrónica de 4 a 20 mA de corriente continua. La señal neumática de 3 a 15 psi equivale a 0.206 – 1.033 bar (0.21- 1.05 kg/cm²) por lo cual, también se

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

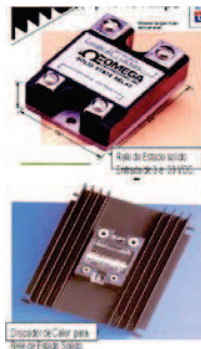
emplea la señal en unidades métricas 0.2 a 1 bar (0.2 a 1 kg/cm²). Asimismo, se emplean señales electrónicas de 1 a 5 mA c.c., de 10 a 50 mA c.c. y de 0 a 20 mA c.c., si bien la señal normalizada es de 4-20 mA c.c. La señal digital utilizada en algunos transmisores inteligentes es apta directamente para ordenador.

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



(fig. 1.5)

Los **transductores** reciben una señal de entrada función de una o más cantidades físicas y la convierten modificada o no a una señal de salida. Son transductores, un relé, un elemento primario, un transmisor, un convertidor PP / I (presión de proceso a intensidad), un convertidor PP / P (presión de proceso a señal neumática), etc.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Los **convertidores** (fig. 1.6) son aparatos que reciben una señal de entrada neumática (3-15 psi) o electrónica (4-20 mA c.c.) procedente de un instrumento y después de modificarla envían la resultante en forma de señal de salida estándar.

Ejemplo: Un convertidor P/I (señal de entrada neumática a señal de salida electrónica, un convertidor I/P (señal de entrada eléctrica a señal de salida neumática).

Conviene señalar que a veces se confunde convertidor con transductor. Este último término es general y no debe aplicarse a un aparato que convierta una señal de instrumentos.



(fig. 1.6)

Los **receptores** reciben las señales procedentes de los transmisores y las indican o registran. Los receptores controladores envían otra señal de salida normalizada a los valores ya indicados 3-15 psi en señal neumática, o 4-20 mA c.c. en señal electrónica, que actúan sobre el elemento final de control.

Los **controladores** (fig. 1.7) comparan la variable controlada (presión, nivel, temperatura) con un valor deseado y ejercen una acción correctiva de acuerdo con la desviación.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

La variable controlada la pueden recibir directamente, como controladores locales o bien indirectamente en forma de señal neumática, electrónica o digital procedente de un transmisor.



(fig. 1.7)

(4) “El **elemento final de control** (fig. 1.8) recibe la señal del controlador y modifica el caudal del fluido o agente de control. En el control neumático, el elemento suele ser una válvula neumática o un servomotor neumático que efectúan su carrera completa de 3 a 15 psi (0,2-1 bar). En el control electrónico la válvula o el servomotor anteriores son accionados a través de un convertidor de intensidad a presión (I/P) o señal digital a presión que convierte la señal electrónica de 4 a 20 mA c.c. o digital a neumática 3-15 psi. En el control eléctrico el elemento suele ser una válvula motorizada que efectúa su carrera completa accionada por un servomotor eléctrico”.

En el control electrónico y en particular en regulación de temperatura de hornos pueden utilizarse rectificadores de silicio (tiristores). Éstos se comportan esencialmente como bobinas de impedancia variable y varían la corriente de alimentación de las resistencias del horno, en la misma forma en que una válvula de control cambia el caudal de fluido en una tubería.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Las señales neumáticas (3-15 psi o 0.2 - 1 bar o 0.2-1 kg/cm²) y electrónica (4-20 mA c.c.) permiten el intercambio entre instrumentos de la planta. No ocurre así en los instrumentos de señal de salida digital (transmisores, controladores) donde las señales son propias de cada suministrador.



(fig. 1.8)

6.1.3. En función de la variable de proceso.

De acuerdo con la variable del proceso, los instrumentos se dividen en instrumentos de caudal, nivel, presión, temperatura, densidad y peso específico, humedad y punto de rocío, viscosidad, posición, velocidad, pH, conductividad, frecuencia, fuerza, turbidez, etc. Esta clasificación corresponde específicamente al tipo de las señales medidas siendo independiente del sistema empleado en la conversión de la señal de proceso. De este modo, un transmisor neumático de temperatura del tipo de bulbo y capilar, es un instrumento de temperatura a pesar de que la medida se efectúa convirtiendo las variaciones de presión del fluido que llena el bulbo y el capilar; el aparato receptor de la señal neumática del transmisor anterior es un instrumento de temperatura, si bien, al ser receptor neumático lo podríamos considerar instrumento de presión, caudal, nivel o

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

cualquier otra variable, según fuera la señal medida por el transmisor correspondiente; un registrador potenciométrico puede ser un instrumento de temperatura, de conductividad o de velocidad, según sean las señales medidas por los elementos primarios de termopar, electrodos o dínamo.

Asimismo, esta clasificación es independiente del número y tipo de transductores existentes entre el elemento primario y el instrumento final. Así ocurre en el caso de un transmisor electrónico de nivel de 4 a 20 mA c.c., un receptor controlador con salida de 4-20 mA c.c., un convertidor intensidad-presión (I/P) que transforma la señal de 4-20 mA c.c. a neumática de 3-15 psi y la válvula neumática de control; todos estos instrumentos se consideran de nivel. En la designación del instrumento se utiliza en el lenguaje común las dos clasificaciones expuestas anteriormente. Y de este modo, se consideran instrumentos tales como transmisores ciegos de presión, controladores registradores de temperatura, receptores indicadores de nivel, receptores controladores registradores de caudal, etc.

En la figura 1.9 pueden verse los diversos instrumentos descritos.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Nótese que se consideran instrumentos de campo y de panel; la primera designación incluye los instrumentos locales situados en el proceso o en sus proximidades (es decir, en tanques, tuberías, secadores, etc.) mientras que la segunda se refiere a los instrumentos montados en paneles, armarios o pupitres situados en salas aisladas o en zonas del proceso.

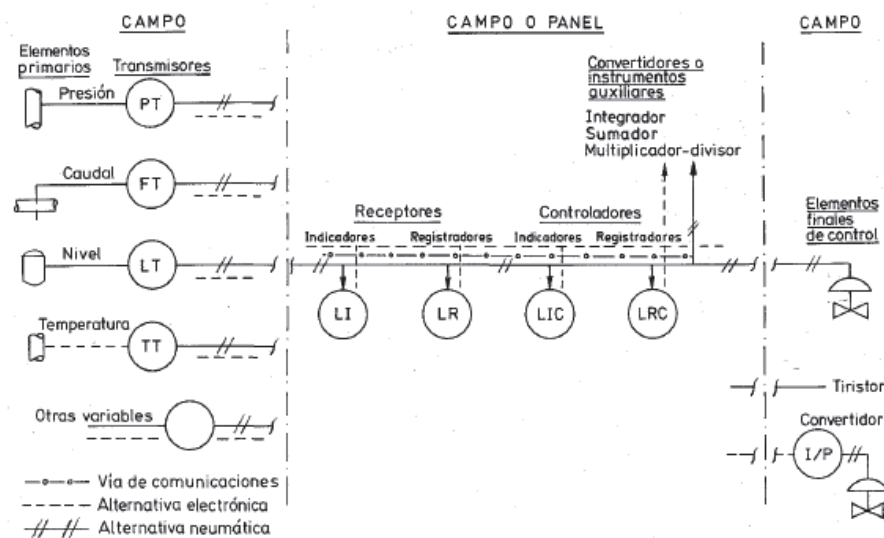


Fig. 1.12 Clases de instrumentos.

6.1.4. Código de identificación de instrumentos.

(5.)“Para designar y representar los instrumentos de medición y control se emplean normas muy variadas que a veces varían de industria en industria. Esta gran variedad de normas y sistemas utilizados en las organizaciones industriales indica la necesidad universal de una normalización en este campo. Varias sociedades han dirigido sus esfuerzos en este sentido, y entre ellas se encuentra como una de las importantes la Sociedad de Instrumentos de Estados Unidos, ISA (Instrument Society of America)

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

cuyas normas tienen por objeto establecer sistemas de designación (código y símbolos) de aplicación a las industrias químicas, petroquímicas, aire acondicionado, etc. Figura a continuación un resumen de las normas ISA-S5.1-84 de ANSI/ISA del año 1984 con una rectificación el año 2002, sobre instrumentación de medición y control, de ISA-S5.2-76 del año 1976 con una rectificación el año 2002 Binary Logic Diagrams for Process Operations sobre símbolos de operaciones binarias de procesos, y de ISA-S5.3 Graphic Symbols for Distributed Control/Shared Display Instrumentation, Logic and Computer Systems 1993, sobre símbolos de sistemas de microprocesadores con control compartido. Hay que señalar al lector que estas normas no son de uso obligatorio sino que constituyen una recomendación a seguir en la identificación de los instrumentos en la industria”.

Símbolos y Diagramas.

Como en todas las ciencias, es importante la estandarización de las partes y el todo de un proceso, cuyo propósito es establecer de manera uniforme la designación de los instrumentos y sistemas usados en la medición y control de variables. En el área de instrumentación se ha desarrollado el tema de símbolos y diagramas buscando tener la descripción de los sistemas de control de una planta o proceso de manera estandarizada. 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 interconectados, y de alguna manera, la instrumentación empleada. En América, la Sociedad de Instrumentistas de América (ISA por sus siglas en inglés de Instruments Society of

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

América) publica normas para símbolos, términos y diagramas que son generalmente reconocidos y adoptados por la industria en general.

Simbología













(6) “El símbolo más empleado en todo diagrama de instrumentos, es un círculo el cual contiene una combinación de letras y números que definen el tipo de variable, el instrumento que actúa con ésta y el número de lazo. En la figura se muestra la simbología empleada para diferentes aplicaciones con el fin de definir un instrumento dentro de un diagrama de instrumentos.

Como se mencionó anteriormente, para poder identificar la variable de proceso se creó el manejo de letras y números que nos permiten conocer el tipo de la variable, el instrumento con el cual se registra, indica o manipula la variable y el número de identificación de la misma, de esta manera se puede asociar fácilmente el tipo de medición que se efectúa en el proceso”.

En los diagramas, los números de identificación se colocan dentro de círculos, las letras están en la mitad superior mientras que los números del lazo de control están en la mitad inferior. Las líneas dibujadas en el centro de los círculos tienen diferentes significados: una línea continua indica un instrumento montado en el panel de control y una línea punteada indica que está atrás del tablero de control. Un círculo sin línea en el centro indica que está montado de manera local, en el campo, o dicho de otra manera, junto al equipo de proceso. Es obvio que todo instrumento debe tener una etiqueta como identificación, la cual debe tener la misma nomenclatura que en el diagrama de

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

instrumentos. En la figura, se mencionan las letras y su significado: considerando las letras de la primera columna, se tiene que: la letra F significara flujo, la T Temperatura, la L (level) Nivel, etc. La combinación de la primera columna y el resto de ellas dará como resultado una combinación de funciones que indicará cómo se está manipulando la variable. Si se emplea la primera letra combinada con el modificador, esto puede indicar, si se emplea la letra D que es una lectura diferencial, o que se está totalizando si se emplea la letra Q; y así sucesivamente. Con un poco de práctica se podrán conocer las posibles combinaciones que se requieran para poder identificar la instrumentación de un diagrama o para diseñarlo.

	Ubicación principal accesible al operador	Montaje en campo	Ubicación auxiliar accesible al operador
Instrumentos discretos	1 	2 	3 
Indicador / controlador	4 	5 	6 
Función de cómputo	7 	8 	9 
Control lógico programable	10 	11 	12 

Los dispositivos que se encuentren ocultos (por ejemplo atrás de un panel),
pueden simbolizarse de la misma forma, pero con una línea punteada.

Fig. 2-1. Simbología para elementos de control.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Primera letra		Letras posteriores.			
Variable de medida	Letra de modificación	Función de lectura pasiva	Función de salida	Letra de modificación	
A	Análisis		Alarma		
B	Llama (Quemador)		Libre (1)	Libre (1)	
C	Conductividad			Control	
D	Densidad o peso específico	Diferencial (3)			
E	Voltaje (f.e.m.)		Elemento primario		
F	Flujo (caudal)	Relación (3)			
G	Calibre		Vidrio (8)		
H	Manual			Alto (6) (13) (14)	
I	Corriente eléctrica		Indicación o indicador (9)		
J	Potencia	Exploración (6)			
K	Tiempo			Estación de control	
L	Nivel		Luz piloto (10)	Bajo (6) (13) (14)	
M	Humedad			Medio o intermedio (6) (13)	
N	Libre		Libre	Libre	
O	Libre		Orificio		
P	Presión o vacío		Punto de prueba		
Q	Cantidad	Integración (3)			
R	Radioactividad		Registro		
S	Velocidad o frecuencia	Seguridad (7)		Interruptor	
T	Temperatura			Transmisión o transmisor.	
U	Multivariable		Multifunción (11)	Multifunción (11)	
V	Viscosidad			Válvula	
W	Peso o fuerza		Vaina		
X	Sin clasificar		Sin clasificar	Sin clasificar	

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Y	Libre			Relé (12)	
Z	Posición			Elemento final de control Sin clasificar	

(1) Para cubrir las designaciones no normalizadas que pueden emplearse repetidamente en un proyecto se han previsto letras libres. Estas letras pueden tener un significado como primera letra y otro como letra sucesiva. Por ejemplo, la letra N puede representar como primera letra el módulo de elasticidad y como sucesiva un osciloscopio.

(2) La letra sin clasificar X, puede emplearse en las designaciones no indicadas que se utilicen sólo una vez o un número limitado de veces. Se recomienda que su significado figure en el exterior del Circulo de identificación del instrumento. Ejemplo: XR-3 registrador de vibración.

(3) Cualquier letra primera si se utiliza con las letras de modificación D (diferencial), F (relación) o Q (integración) o cualquier combinación de las mismas cambia su significado para representar una nueva variable medida. Por ejemplo, los instrumentos TDI y TI miden dos variables distintas, la temperatura diferencial y la temperatura, respectivamente.

(4) La letra A para análisis, abarca todos los análisis no indicados en la tabla 1.1, que no están cubiertos por una letra libre. Es conveniente definir el tipo de análisis al lado del símbolo en el diagrama de proceso.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

- (5) El empleo de la letra U como multivariable en lugar de una combinación de primeras letras, es opcional.
- (6) El empleo de los términos de modificaciones alto, medio, bajo, medio o intermedio y exploración, es preferible pero opcional.
- (7) El término seguridad, debe aplicarse sólo a elementos primarios y a elementos finales de control que protejan contra condiciones de emergencia (peligrosas para el equipo o el personal). Por este motivo, una válvula autorreguladora de presión que regula la presión de salida de un sistema, mediante el alivio o escape de fluido al exterior, debe ser PCV, pero si esta misma válvula se emplea contra condiciones de emergencia, se designa PSV. La designación PSV se aplica a todas las válvulas proyectadas para proteger contra condiciones de emergencia de presión sin tener en cuenta si las características de la válvula y la forma de trabajo la colocan en la categoría de válvula de seguridad, válvula de alivio, o válvula de seguridad de alivio.
- (8) La letra de función pasiva vidrio, se aplica a los instrumentos que proporcionan una visión directa no calibrada del proceso.
- (9) La letra indicación se refiere a la lectura de una medida real de proceso. No se aplica a la escala de ajuste manual de la variable si no hay indicación de ésta.
- (10) Una luz piloto que es parte de un bucle de control debe designarse por una primera letra seguida de la letra sucesiva L. Por ejemplo, una luz piloto que indica un período de tiempo terminado se designará KL. Sin embargo, si se desea identificar una luz piloto fuera del bucle de control, la luz piloto puede designarse en la misma forma o bien

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

alternativamente por una letra única L. Por ejemplo, una luz piloto de marcha de un motor eléctrico puede identificarse EL, suponiendo que la variable medida adecuada es la tensión, o bien XL, suponiendo que la luz es excitada por los contactos eléctricos auxiliares del arrancador del motor o bien simplemente L. La actuación de la luz piloto puede ser acompañada por una señal audible.

(11) El empleo de la letra U como multifunción en lugar de una combinación de otras letras, es opcional.

(12) Se supone que las funciones asociadas con el uso de la letra sucesiva Y se definirán en el exterior del símbolo del instrumento cuando sea conveniente hacerlo así.

(13) Los términos alto, bajo y medio o intermedio deben corresponder a valores de la variable medida, no a los de la señal a menos que se indique de otro modo. Por ejemplo, una alarma de nivel alto derivada de una señal de un transmisor de nivel de acción inversa debe designarse LAH incluso aunque la alarma sea actuada cuando la señal cae a un valor bajo.

(14) Los términos alto y bajo, cuando se aplican a válvulas, o a otros dispositivos de cierre apertura, se definen como sigue:

Alto: Indica que la válvula está, o se aproxima a la posición de apertura completa.

Bajo: Denota que se acerca o está en la posición completamente cerrada.

Símbolos de las señales de la instrumentación

Las señales de instrumentación utilizadas en el control de procesos son usualmente de los siguientes tipos: conexión a proceso, electrónica (eléctrica), neumática, hidráulica,

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

capilar, sónica o indicando radioactividad. Cada señal tiene un símbolo diferente y los símbolos son mostrados en la figura.

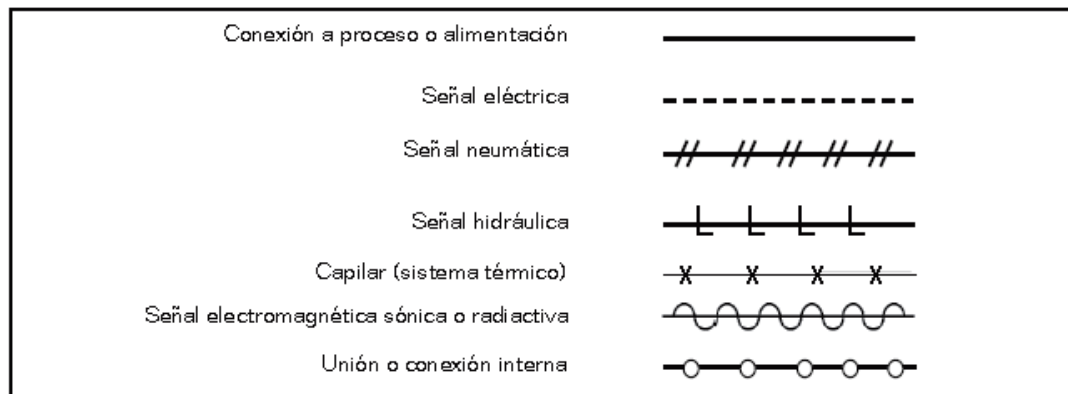


Fig. 2-4. Simbología de las líneas de conexión de instrumentos.

Se sugieren las siguientes abreviaturas para representar el tipo de alimentación (o bien de purga de fluidos)

AS Alimentación de aire.

ES Alimentación eléctrica.

GS Alimentación de gas.

HS Alimentación hidráulica.




NS Alimentación de nitrógeno.




SS Alimentación de vapor.

WS Alimentación de agua.


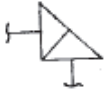



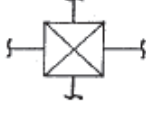
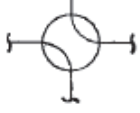
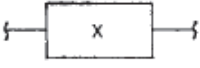
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Símbolos generales

 <p style="font-size: small;">∅ aprox. 7/16" = 11,1mm</p>			
LOCAL	MONTAJE EN PANEL 1	MONTAJE DETRAS DEL PANEL	
INSTRUMENTO PARA UNA VARIABLE MEDIDA CON CUALQUIER NÚMERO DE FUNCIONES			

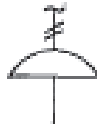
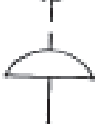
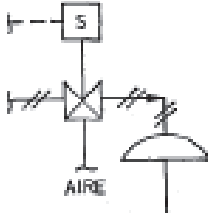
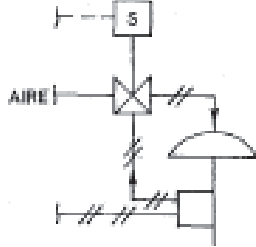
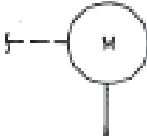
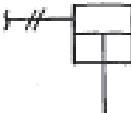

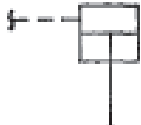


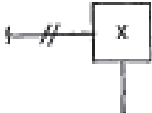
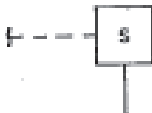

		 <p style="font-size: small;">AUX.</p>	
MONTAJE LOCAL	MONTAJE EN PANEL	MONTAJE DETRAS DE PANEL AUXILIAR	
INSTRUMENTO PARA DOS VARIABLES MEDIDAS. OPCIONALMENTE INSTRUMENTO CON MÁS DE UNA FUNCION. PUEDEN AÑADIRSE CIRCULOS ADICIONALES SI SE PRECISAN			

Símbolos para válvulas de control

			
GLOBO, COMPUERTA U OTRA	ANGULO	MARIPOSA, PERSIANA O COMPUERTA	OBTURADOR ROTA- TIVO O VALVULA DE BOLA
			
TRES VIAS	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	
CUATRO VIAS			
			
SIN CLASIFICAR			



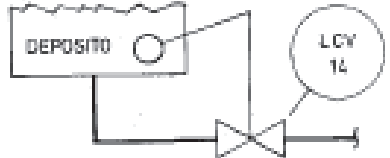

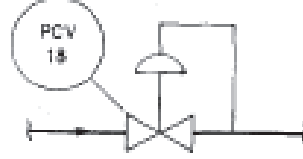
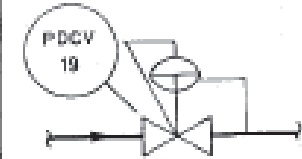

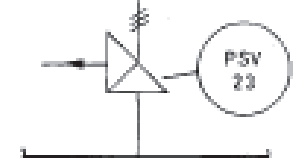
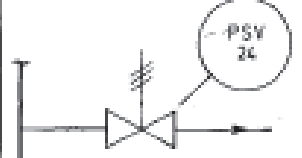
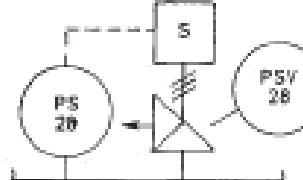
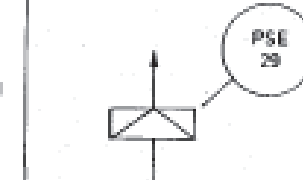
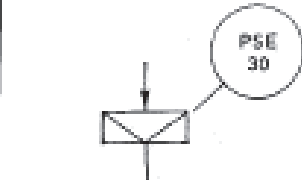
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Simbolos para actuadores

			
SIN POSICIONADOR	PREFERIDA PARA DIAFRAGMA CON PILOTO (POSICIONADOR, VALVULA SOLENOIDE, ...)	PREFERIDO	OPCIONAL
DIAFRAGMA CON MUELLE		DIAFRAGMA CON MUELLE, POSICIONADOR Y VALVULA PILOTO QUE PRESURIZA EL DIAFRAGMA AL ACTUAR	
			
MOTOR ROTATIVO	SIMPLE ACCIÓN	DOBLE ACCIÓN	
CILINDRO SIN POSICIONADOR U OTRO PILOTO			
			
PREFERIDO PARA CUALQUIER CILINDRO	ACTUADOR MANUAL	ELECTROHIDRAULICO	
			
SIN CLASIFICAR	SOLENOIDE	PARA VALVULA DE ALIVIO O DE SEGURIDAD (DENOTA UN MUELLE, PESO, O PILOTO INTEGRAL)	

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Autorreguladores

CAUDAL	 <p>REGULADOR AUTOMÁTICO CON INDICACIÓN INTEGRAL DEL CAUDAL</p>	 <p>POTAMETRO INDICADOR CON VALVULA MANUAL DE REGULACIÓN</p>	
NIVEL	 <p>CONTROLADOR DE NIVEL CON ENLACE MECÁNICO</p>		
PRESIÓN	 <p>AUTORREGULADOR DE PRESIÓN CON TOMA INTERIOR</p>	 <p>AUTORREGULADOR DE PRESIÓN CON TOMA EXTERIOR</p>	 <p>REGULADOR REDUCTOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL CON TOMAS INTERIOR Y EXTERIOR</p>
	 <p>AUTORREGULADOR DE PRESIÓN POSTERIOR CON TOMA INTERIOR</p>	 <p>VALVULA DE ALIVIO O DE SEGURIDAD DE ANGULO</p>	 <p>VALVULA DE ALIVIO O DE SEGURIDAD DE PASO RECTO</p>
	 <p>VALVULA DE ALIVIO O DE SEGURIDAD DE ANGULO DISPARADA POR SOLENOIDE</p>	 <p>DISCO DE RUPTURA PARA PRESIÓN</p>	 <p>DISCO DE RUPTURA PARA VACÍO</p>

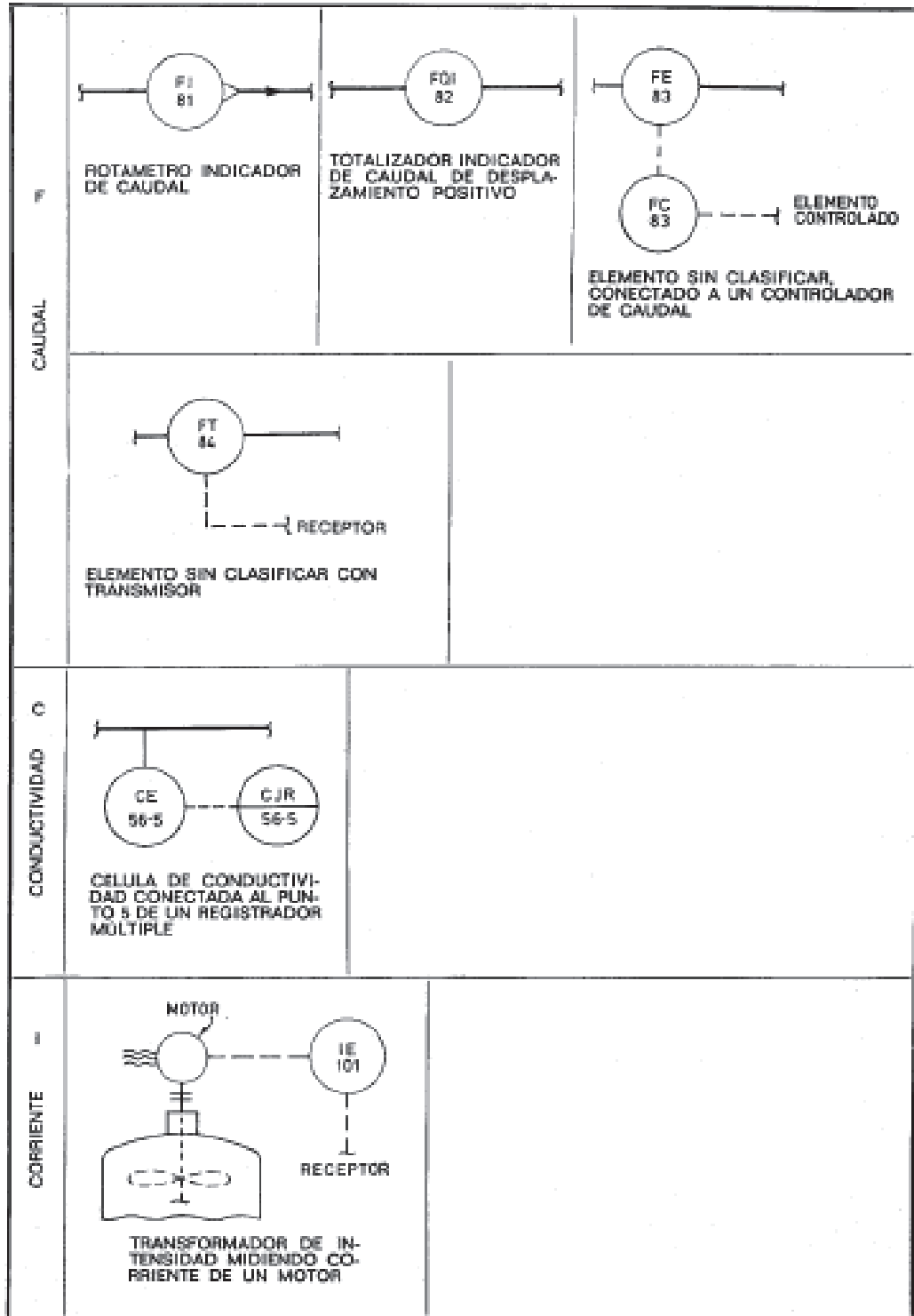
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Elementos primarios

A ANÁLISIS	<p style="text-align: center;">RECEPTOR RECEPTOR</p> <p style="text-align: center;">ANÁLISIS DOBLE DE OXÍGENO Y COMBUSTIBLE</p>		
F CAUDAL	<p style="text-align: center;">PLACA-ORIFICIO CON TOMAS EN LA BRIDA O EN LA CAMARA ANULAR</p>	<p style="text-align: center;">PLACA-ORIFICIO CON TOMAS EN LA VENA CONTRAÍDA, RADIALES O EN LA TUBERÍA</p>	<p style="text-align: center;">PLACA-ORIFICIO CONECTADA A UN TRANSMISOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL</p>
	<p style="text-align: center;">PLACA-ORIFICIO CON ACCESORIO DE CAMBIO RÁPIDO</p>	<p style="text-align: center;">TUBO PITOT O TUBO VENTURI-PITOT</p>	<p style="text-align: center;">TUBO VENTURI O TOBERA</p>
	<p style="text-align: center;">CANAL MEDIDOR</p>	<p style="text-align: center;">VERTEDERO</p>	<p style="text-align: center;">ELEMENTO DE TURBINA</p>

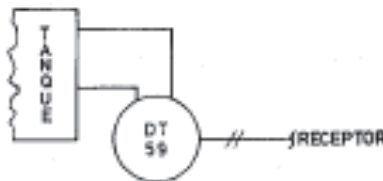
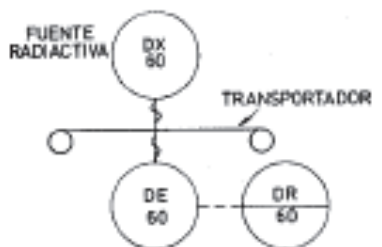
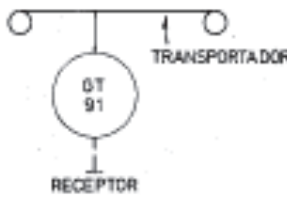
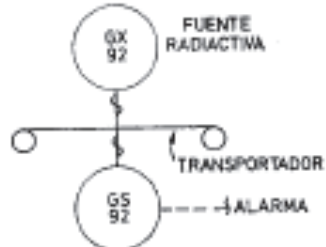
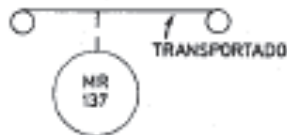
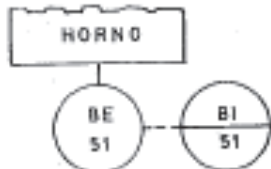
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Elementos primarios (Cont.)





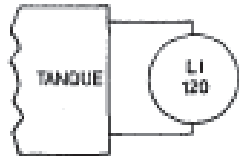
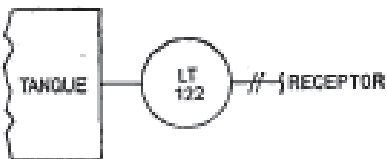
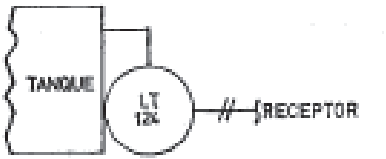
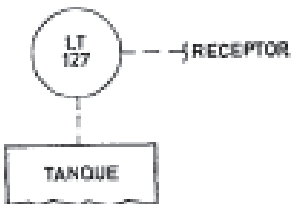
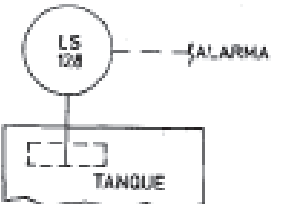
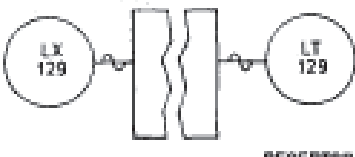
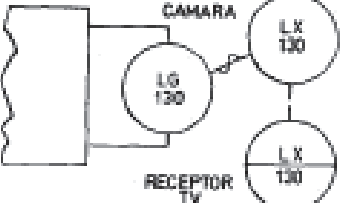

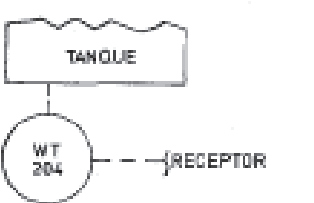
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Elementos primarios (Cont.)

D DENSIDAD O PESO ESPECIFICO	 <p style="text-align: center;">TRANSMISOR DE DENSIDAD DE PRESION DIFERENCIAL</p>	 <p style="text-align: center;">ELEMENTO RADIATIVO DE DENSIDAD CONECTADO A UN REGISTRADOR EN PANEL</p>
G ESPESOR	 <p style="text-align: center;">TRANSMISOR DE RODILLO</p>	 <p style="text-align: center;">INTERRUPTOR DE ESPESOR RADIATIVO</p>
M HUMEDAD	 <p style="text-align: center;">REGISTRADOR DE HUMEDAD</p>	
B LLAMA	 <p style="text-align: center;">DETECTOR DE LLAMA CONECTADO A UN INDICADOR DE INTENSIDAD DE LLAMA</p>	

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Elementos primarios (Cont.)

		
<p>NIVEL DE VIDRIO INTEGRAL CON EL TANQUE</p>	<p>NIVEL DE VIDRIO DE CO-NEXIÓN EXTERNA</p>	<p>INDICADOR DE NIVEL DE FLOTADOR O DE DESPLAZAMIENTO</p>
		
<p>TRANSMISOR DE NIVEL DE FLOTADOR O DESPLAZAMIENTO MONTADO EN EL EXTERIOR DEL TANQUE</p>	<p>TRANSMISOR DE NIVEL DE PRESIÓN DIFERENCIAL MONTADO EN EL TANQUE</p>	
		
<p>ELEMENTO DE NIVEL DE CAPACIDAD CONECTADO A UN TRANSMISOR DE NIVEL</p>	<p>INTERRUPTOR DE NIVEL DE SÓLIDOS DE PALETAS</p>	
		
<p>TRANSMISOR DE NIVEL RADIACTIVO O SÓNICO</p>	<p>VISIÓN REMOTA DE UN NIVEL DE VIDRIO MEDIANTE CÁMARA DE TELEVISIÓN</p>	
		
<p>TRANSMISOR DE PESO DE CONEXIÓN DIRECTA</p>	<p>GALGA EXTENSOMÉTRICA CONECTADA A UN TRANSMISOR DE PESO</p>	

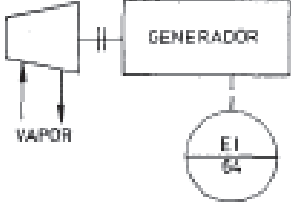



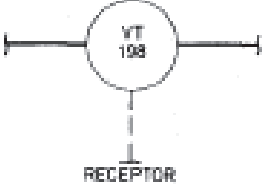
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Elementos primarios (Cont.)

N	<p>INTERRUPTOR DE FIN DE CARRERA ACCIONADO CUANDO LA VALVULA CIERRA A UNA POSICIÓN PREDETERMINADA.</p>	
POTENCIA	<p>VATIMETRO CONECTADO AL MOTOR DE UNA BOMBA.</p>	
PRESIÓN O VACÍO	<p>MANÓMETRO</p>	<p>CON LINEA DE PRESIÓN</p>
		<p>MONTAJE EN LINEA</p>
	MANÓMETRO CON SELLO	
PRESIÓN	<p>ELEMENTO DE PRESIÓN DE GALGA EXTENSOMÉTRICA CONECTADO A UN TRANSMISOR INDICADOR DE PRESIÓN</p>	
RADIATIVIDAD	<p>INDICADOR DE RADIATIVIDAD</p>	

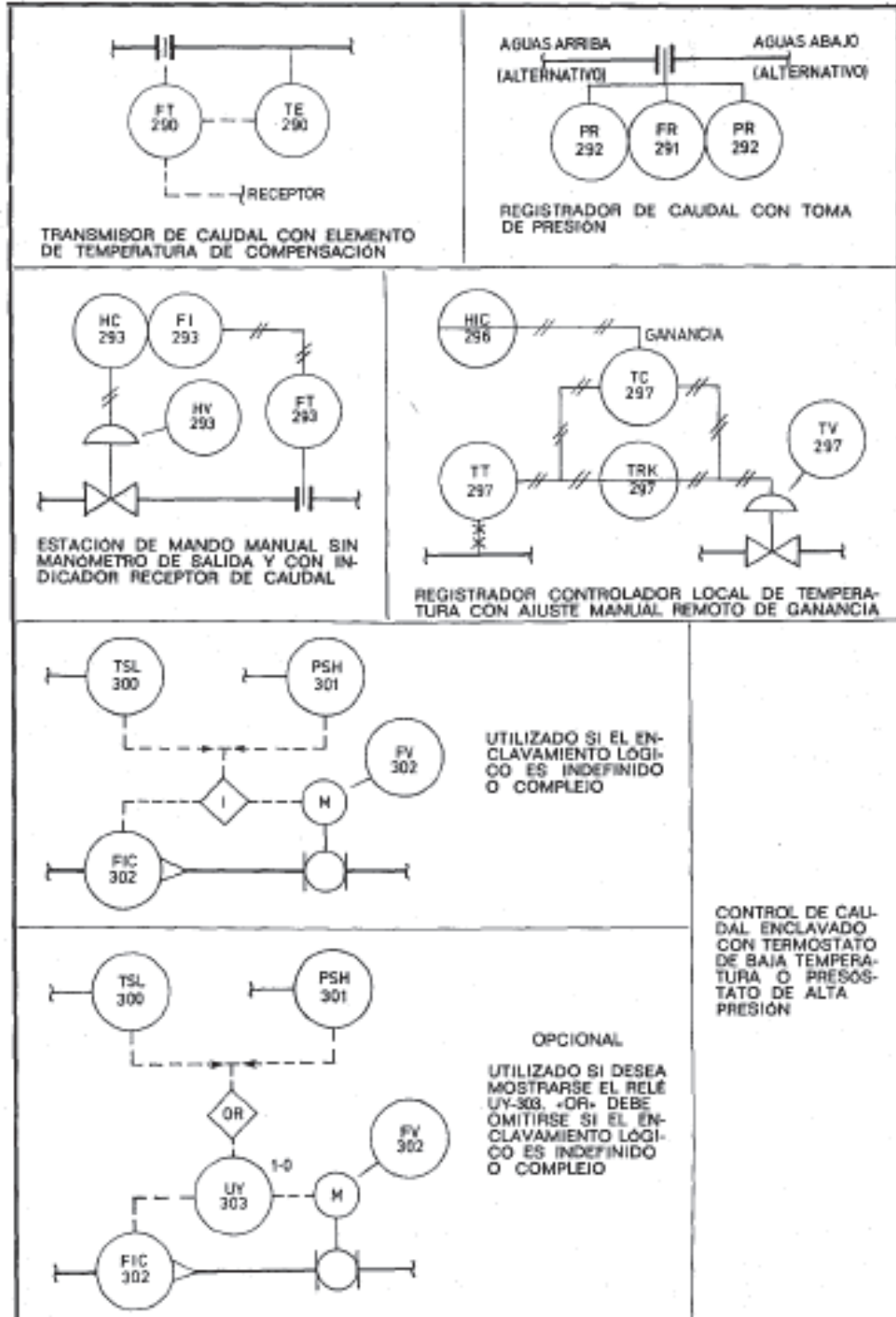
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Elementos primarios (Cont.)

<p>Ⓜ</p> <p>TENSIÓN</p>	 <p>VOLTIMETRO INDICADOR CONECTADO A UN GENERADOR DE TURBINA</p>	
<p>Ⓚ</p> <p>TIEMPO O PROGRAMADOR</p>	 <p>RELOJ</p>	 <p>PUNTO 7. PROGRAMADOR MULTIPUNTO, TODO-NADA.</p>
<p>Ⓢ</p> <p>VELOCIDAD O FRECUENCIA</p>	 <p>TRANSMISOR DE VELOCIDAD</p>	
<p>⓪</p> <p>VISCOSIDAD</p>	 <p>TRANSMISOR DE VISCOSIDAD</p>	

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Sistemas varios



CONTROL DE CAUDAL ENCLAVADO CON TERMOSTATO DE BAJA TEMPERATURA O PRESOSTATO DE ALTA PRESIÓN

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.2. TRANSMISORES.

6.2.1 Introducción.

Los transmisores son instrumentos que captan la variable de proceso y la transmiten a distancia a un instrumento receptor, indicador, registrador, controlador o una combinación de estos. Existen varios tipos de señales de transmisión: neumáticas, electrónicas, digitales, hidráulicas y telemétricas. Las más empleadas en la industria son las tres primeras, las señales hidráulicas se utilizan ocasionalmente cuando se necesita una gran potencia y las señales telemétricas se emplean cuando hay una distancia de varios kilómetros entre el transmisor y el receptor.

(7) “Los transmisores neumáticos generan una señal neumática variable linealmente de 3 a 15 psi (libras por pulgada cuadrada) para el campo de medida de 0-100 % de la variable. Esta señal está normalizada por la SAMA-Asociación de fabricantes de instrumentos (Scientific Apparatus Makers Association) y ha sido adoptada en general por los fabricantes de transmisores y controladores neumáticos en Estados Unidos.

En los países que utilizan el sistema métrico decimal se emplea además la señal 0.2 - 1 bar (1 bar = 1,02 kg/ cm²) que equivale aproximadamente a 3-15 psi (3 psi = 0.206 bar o 0.21 kg/cm²). Los transmisores electrónicos generan la señal estándar de 4-20 mA c.c., a distancias de 200 m a 1 km, según sea el tipo de instrumento transmisor. La señal 1-5 V c.c. es útil cuando existen problemas en el suministro electrónico. De todos modos, basta conectar una línea de 250 Ω para tener la señal electrónica de 4-20 mA c.c. La señal electrónica de 4 a 20 mA c.c. tiene un nivel suficiente y de compromiso entre la distancia

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

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 de 4 a 20 mA c.c. es de 1 a 5, la misma que la razón de 3 a 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”.

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 está en su nivel más bajo.

Salvo indicación contraria, en lo que sigue se supondrá que la señal neumática es de 0.2 - 1 bar (3-15 psi), y la electrónica de 4 a 20 mA c.c. Nótese que el nivel mínimo de la señal neumática de salida no es cero, sino que vale 3 psi (0.2 bar). De este modo se consigue calibrar correctamente el instrumento, comprobar su correcta calibración y detectar fugas de aire en los tubos de enlace con los demás instrumentos neumáticos y así, se comprueba rápidamente que un transmisor neumático de temperatura de intervalo de medida 0-150 °C con el bulbo a 0°C y con señal de salida 1 psi está descalibrado; si el nivel estándar mínimo de salida fuera de 0 psi no sería posible esta comprobación rápida y para efectuarla habría que aumentar la temperatura hasta detectar presión en la salida. Asimismo, cuando el conducto neumático que llega hasta el receptor se perfora por accidente, la señal neumática puede llegar a anularse, facilitando la detección de la avería

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

la lectura del instrumento receptor (en el ejemplo anterior, si el receptor fuera un manómetro de margen 3-15 psi con graduación 0-150 °C el índice señalaría un valor inferior al cero del instrumento). La señal digital consiste en una serie de impulsos en forma de bits. Cada bit consiste en dos signos, el 0 y el 1 (código binario), y representa el paso (1) o no (0) de una señal a través de un conductor. Por ejemplo, dentro de la señal electrónica de 4-20 mA c.c., los valores binarios de 4, 12 y 20 mA son respectivamente de 00000000, 01111111 y 11111111. Si la señal digital que maneja el microprocesador del transmisor es de 8 bits, entonces puede enviar 8 señales binarias (0 y 1) simultáneamente. Como el mayor número binario de 8 cifras es

$$11111111 = 1 + 1 \times 2 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^3 + \dots + 1 \times 2^7 = 255$$

Se sigue que la precisión obtenida con el transmisor debido exclusivamente a la señal digital es de:

$$\frac{1}{255} \times 100 = \pm 0.4\%$$

Si la señal es de 16 bits, entonces puede manejar 16 señales binarias (0 y 1). Siendo el mayor número binario de 16 cifras

$$1111111111111111 = 1 + 1 \times 2 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^3 + \dots + 1 \times 2^{15} = 65535.$$

La precisión obtenida con el transmisor debido exclusivamente a la señal digital es de:

$$\frac{1}{65535} \times 100 = 0,00152$$

Las fibras ópticas en la transmisión se están utilizando en lugares de la planta donde las condiciones son duras (campos magnéticos intensos que influyen sobre la señal). Los

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

módulos de transmisión pueden ser excitados por fuentes de luz de LED (Light Emitting Diodes) o diodo láser. Los módulos receptores disponen de fotodetector y preamplificador, con los cables o multicables de fibra óptica y con convertidores electroópticos. La transmisión de datos puede efectuarse con multiplexores transmitiendo simultáneamente a la velocidad máxima definida por la norma RS232 de transmisión de datos para modems y multiplexores. Las ventajas de la transmisión por fibra óptica incluyen la inmunidad frente al ruido eléctrico (interferencias electromagnéticas), el aislamiento eléctrico total, una anchura de banda mayor que la proporcionada por los correspondientes hilos de cobre, ser de pequeño tamaño y de poco peso, sus bajas pérdidas de energía, y que las comunicaciones sean seguras. El microprocesador se utiliza en la transmisión por las ventajas que posee de rapidez de cálculo, pequeño tamaño, fiabilidad, precio cada vez más competitivo y ser apto para realizar cálculos adicionales.

6.2.2 Transmisores neumáticos.

6.2.2.1 Bloque amplificador de dos etapas.

(8) “Los transmisores neumáticos se basan en el sistema tobera obturador que convierte el movimiento del elemento de medición en una señal neumática. En la figura 2.1 se presenta el conjunto.

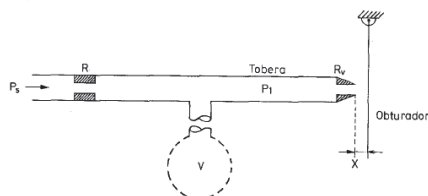


Fig. 2.1 Sistema tobera-obturador.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

El aire de alimentación de presión normalizada 1.4 bar (20 psi) pasa por la restricción R y llena el volumen cerrado V escapándose a la atmósfera por la tobera R . Esta tiene un diámetro muy pequeño, de unos 0.25 - 0.5 mm, mientras que la restricción R tiene un diámetro alrededor de 0.1 mm. Con el obturador abierto la presión posterior remanente es de unos 0.03 bar, lo cual indica que la relación de presiones diferenciales a través de la restricción R es de $(1.4/0.03) \approx 50$ veces. El consumo de aire del conjunto tobera-obturador es relativamente pequeño, del orden de 3 NI/min”.

En la figura 2.2 se representa una curva de respuesta típica de un sistema tobera-obturador, pudiendo verse que la misma no es lineal. El aire que se escapa de la tobera ejerce una fuerza sobre el obturador $F = P_1 \cdot S$ que tiende a desplazarlo. Esta fuerza debe hacerse despreciable con relación a la fuerza del elemento de medida que posiciona el obturador. Con este objeto, en el amplificador de dos etapas se utiliza sólo una parte reducida de la curva, y se disminuye además la sección de la tobera a diámetros muy pequeños de 0.1 a 0.2 mm (no se consideran diámetros más pequeños para evitar que la tobera se tape por suciedad del aire).

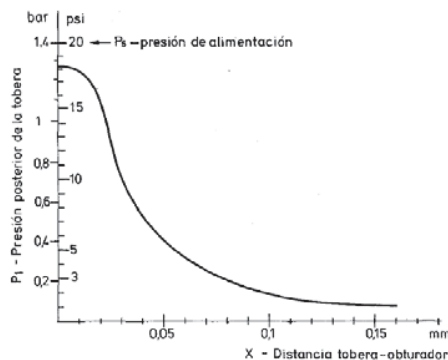


Fig. 2.2 Curva de respuesta de un sistema tobera-obturador.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Como la restricción fija R es 3 a 4 veces menor que la tobera R_v ; sólo pasa por la misma un pequeño caudal de aire, por lo cual, el volumen V debe ser tan reducido como sea posible para obtener un tiempo de respuesta del sistema inferior al segundo.



6.2.2.2 Transmisor de equilibrio de movimientos.

El transmisor de equilibrio de movimientos (fig. 2.5) compara el movimiento del elemento de medición asociado al obturador con un fuelle de realimentación de la presión posterior de la tobera. El conjunto se estabiliza según la diferencia de movimientos alcanzando siempre una posición de equilibrio tal que existe una correspondencia lineal entre la variable y la señal de salida. Hay que señalar que en este tipo de transmisores, las palancas deben ser livianas, pero bastante fuertes para que no se doblen. Estos instrumentos se utilizan, en particular, en la transmisión de presión y temperatura donde los elementos de medida tales como tubos Bourdon, manómetros de fuelle, elementos de temperatura de bulbo y capilar son capaces de generar un movimiento amplio, sea directamente o bien a través de palancas con la suficiente fuerza para eliminar el error de histéresis que pudiera producirse. Si la fuerza disponible es

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

pequeña, aparte de la histéresis, el tiempo necesario para el movimiento es grande y el transmisor es lento en responder a los cambios de la variable. En este caso, se acude a los transmisores de equilibrio de fuerzas en los que básicamente el elemento primario de medida genera una fuerza que se equilibra con otra igual y opuesta producida por el transmisor.

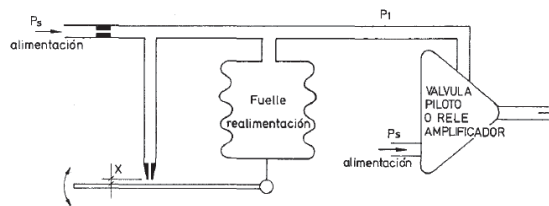


Fig. 2.5 Transmisor de equilibrio de movimientos.

6.2.2.3 Transmisor de equilibrio de fuerzas.

(9) “En la figura puede verse que el elemento de medición ejerce una fuerza en el punto *A* sobre la palanca *AC* que tiene su punto de apoyo en *D*. Cuando aumenta la fuerza ejercida por el elemento de medición, la palanca *AC* se desequilibra, tapa la tobera, la presión aumenta y el diafragma ejerce una fuerza hacia arriba alcanzándose un nuevo equilibrio. Hay que señalar, como se ha dicho, que en este transmisor los movimientos son inapreciables”.

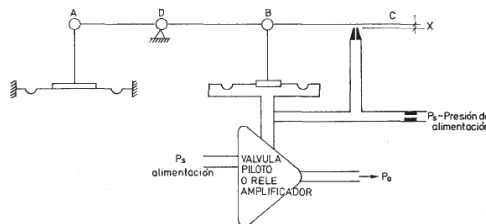


Fig. 2.6. Transmisor de equilibrio de fuerzas.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.2.2.4 Transmisor de equilibrio de momentos.

Transmisor de equilibrio de momentos, el desequilibrio de fuerzas producido por el caudal crea un par al que se opone el generado por el fuelle de realimentación a través de una rueda de apoyo móvil situada en el brazo del transmisor.

6.2.3 Transmisores electrónicos.



6.2.3.1 Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas.

(10) “Los transmisores electrónicos son generalmente de equilibrio de fuerzas (fig.2.8). Consisten en su forma más sencilla en una barra rígida apoyada en un punto sobre la que actúan dos fuerzas en equilibrio:

- La fuerza ejercida por el elemento mecánico de medición (tubo Bourdon, espiral, fuelle).
- La fuerza electromagnética de una unidad magnética.

El desequilibrio entre estas dos fuerzas da lugar a una variación de posición relativa de la barra, excitando un transductor de desplazamiento tal como un detector de inductancia o un transformador diferencial. Se completa así un circuito de realimentación variando la corriente de salida en forma proporcional al intervalo de la variable del proceso.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Estos instrumentos, debido a su constitución mecánica, presentan un ajuste del cero y del alcance complicado y una alta sensibilidad a vibraciones. Su precisión es del orden del 0.5 -1 %.”

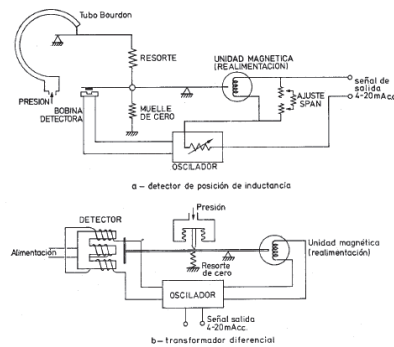


Fig. 2.8 Transmisor electrónico de equilibrio de fuerzas.

6.2.3.2 Detector de posición de inductancia.

El detector de posición de inductancia está formado por dos piezas de ferrita, una en la barra y la otra fijada rígidamente en el chasis del transmisor y contiene una bobina conectada a un circuito oscilador. Cuando aumenta o disminuye el entrehierro disminuye o aumenta respectivamente la inductancia de la bobina detectora modulando la señal de salida del oscilador.

6.2.3.3 Transformador diferencial.

Consiste en un núcleo magnético con tres o más polos bobinados. El bobinado central está conectado a una línea de alimentación estabilizada y se denomina arrollamiento primario. Los otros dos están bobinados idénticamente con el mismo número de espiras y en la misma disposición. El transformador se cierra magnéticamente con la barra de equilibrio de fuerzas. Al variar la presión cambia la posición de la barra induciendo tensiones distintas en las dos bobinas, mayor en la bobina arrollada en el polo con menor

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

entre hierro y menor en la opuesta. Las bobinas están conectadas en oposición y la señal de tensión diferencial producida es introducida en un amplificador transistorizado que alimenta la unidad magnética de reposición de la barra.

6.2.4 Transmisores digitales.



Denominado inteligente (smart transmitter). Este término indica que el sensor tiene incorporadas funciones adicionales que se añaden a las propias de la medida exclusiva de la variable. Lógicamente dichas funciones son proporcionadas por un microprocesador, pero esto no es esencial para que al instrumento pueda aplicársele la denominación de inteligente. Hay dos modelos básicos de transmisores inteligentes: El capacitivo (figura 2.9 a) está basado en la variación de capacidad que se produce en un condensador formado por dos placas fijas y un diafragma sensible interno y unido a las mismas, cuando se les aplica una presión o presión diferencial a través de dos diafragmas externos.

La pastilla de silicio contiene normalmente dos puentes de Wheatstone, uno de presión, y el otro de presión diferencial y una termorresistencia. El microprocesador compensa las no linealidades de los elementos o sensores individuales, convierte las tres señales

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

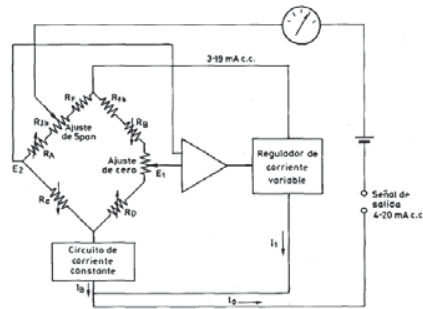
analógicas a impulsos y calcula, mediante datos prefijados en fábrica y almacenados en su memoria, un valor digital de salida que es transformado a la señal de salida analógica de 4-20 mA c.c.

(11) “Un comunicador portátil de teclado alfanumérico que puede conectarse en cualquier punto del cable de dos hilos entre el transmisor y el receptor, permite leer los valores del proceso, configurar el transmisor, cambiar su campo de medida y diagnosticar averías.. Antes de su aparición, la calibración y el cambio del margen de medida debían realizarse normalmente en el taller de instrumentos, lo que equivalía a disponer de aparatos de repuesto para continuar trabajando con el procesó, siendo inevitable la marcha a ciegas durante el tiempo requerido para el cambio mecánico del instrumento (a no ser, naturalmente, que se dispusiera de un instrumento doble).”

En resumen, las ventajas del transmisor inteligente con relación a los instrumentos electrónicos analógicos convencionales (señal de salida 4-20 mA c.c.) son:

- Mejora de la precisión (2:1 como mínimo).
- Mejora de la estabilidad en condiciones de trabajo diversas (3:1 a 15:1).
- Campos de medida más amplios.
- Mayor fiabilidad.
- Bajos costes de mantenimiento.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO



Y si se emplea el transmisor digital inteligente (comunicación digital directa), las ventajas adicionales son:

- Menor desviación por variaciones de la temperatura ambiente o de la tensión de alimentación.
- Diagnóstico continuo del circuito (estado del instrumento). Comunicación bidireccional.
- Configuración remota desde cualquier punto de la línea de transmisión.

En cuanto a las desventajas, existe el problema de la rapidez y la falta de normalización de las comunicaciones. Si el transmisor inteligente transmite una señal rápida, tal como la presión o el caudal, existe el peligro de que la cantidad de tareas y cálculos que debe realizar el microprocesador, le impida captar todos los valores de la variable. En este caso, debe utilizarse un transmisor electrónico analógico.

6.2.5 Comunicaciones.

(12) "La mayor parte de las comunicaciones entre los instrumentos de proceso y el sistema de control se basan en señales analógicas (neumáticas 0.2 - 1 bar 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

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

guardarlos en unidades históricas están aumentando día a día sus aplicaciones. Su precisión es unas 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 está en camino de sustituir a la clásica señal analógica de 4-20 mA c.c. en todos los sistemas de control distribuido (DCS), y controladores programables (PLC), instrumentos de medida y transmisión y válvulas de control. La arquitectura fieldbus conecta estos aparatos con ordenadores que pueden trabajar para muchos niveles en la dirección de la planta.

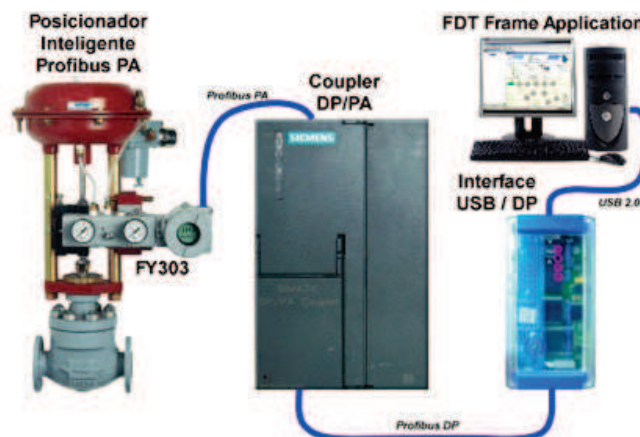


Figura 5 - DTM rodando "dentro" de Frame Application FDT

La arquitectura interna del fieldbus tiene los siguientes niveles o capas:

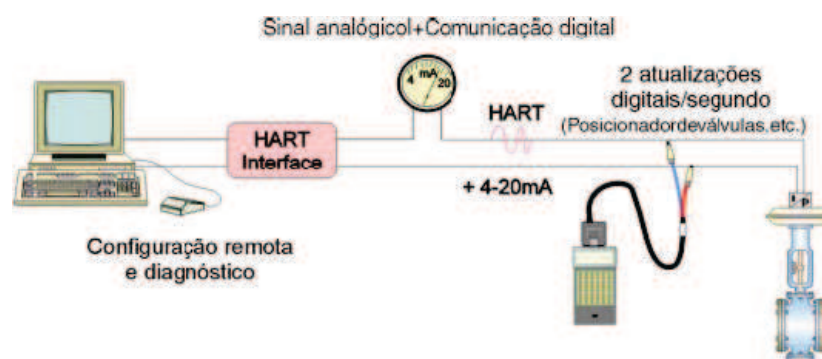
- **Nivel 1:** Físico que especifica las condiciones del medio de transmisión, las características eléctricas, mecánicas, funcionales y la codificación de los datos.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

- **Nivel 2:** Enlace que establece el enlace lógico, el control de flujo y de errores, la sincronización de la transmisión y el control de acceso al medio.
- **Nivel 3 al 6:** Son objeto de protocolo.
- **Nivel 7:** Aplicación que contienen los servicios y regula la transferencia de mensajes entre las aplicaciones del usuario y los diferentes instrumentos.

El primer bus de campo, efectivamente abierto, utilizado ampliamente fue el MODBUS de Gould Modicon que sólo dispone del nivel 1 (físico) y del 2 (enlace).

Los protocolos de comunicaciones abiertos importantes son el HART, World FIB, ISP, BITBUS, INTERBUS-S, P-NÉT, ECHELON y CAN. El protocolo HART (High way-Addressable – Remote -Transducer) desarrollado inicialmente por Rosemount Inc., agrupa la información digital sobre la señal analógica clásica de 4-20 mA c.c. La señal digital usa dos frecuencias individuales, 1200 y 2200 Hz, que representan los dígitos 1 y 0 (figura 2.10) y que forman una onda senoidal que se superpone sobre el lazo de corriente de 4-20 mA c.c. Como la señal promedio de una onda senoidal es cero, no se añade ninguna componente de c.c. a la señal analógica de 4-20 mA c.c. En la figura 2.10 pueden verse las señales que constituyen el protocolo HART.

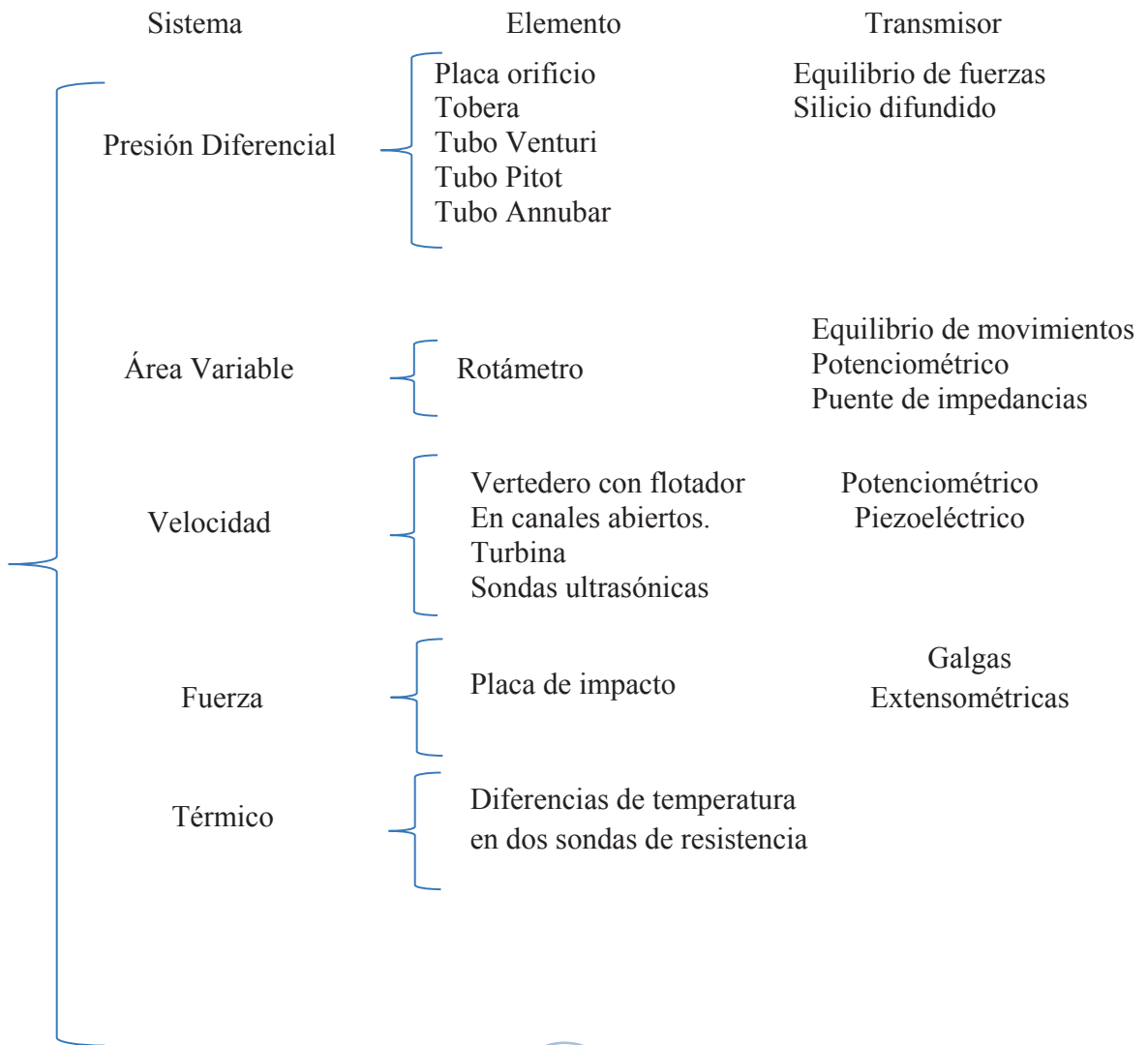


CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.3. MEDIDAS DE CAUDAL.

En la mayor parte de las operaciones realizadas en los procesos industriales y en las efectuadas en laboratorio y en plantas piloto es muy importante la medición de los caudales de líquidos o de gases.

(13) “Existen varios métodos para medir el caudal según sea el tipo de caudal volumétrico o másico deseado. Entre los transductores más importantes figuran los siguientes”:



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

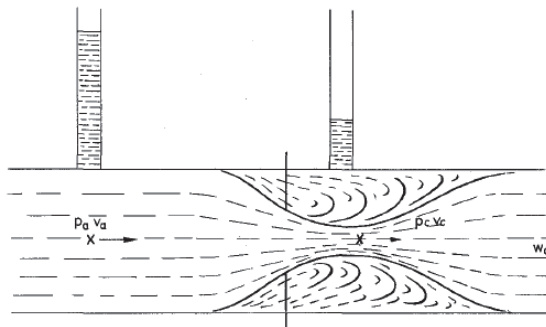
6.3.1 Medidores volumétricos.

Los medidores volumétricos determinan el caudal en volumen del fluido, bien sea directamente (desplazamiento), bien indirectamente por deducción (presión diferencial, área variable, velocidad, fuerza, tensión inducida, torbellino).

6.3.1.1 Instrumentos de presión diferencial.

6.3.1.1.1 Fórmula general.

(14) “La fórmula de caudal obtenida con los elementos de presión diferencial se basa en la aplicación del teorema de Bernouilli:



(Altura cinética + altura de presión + altura potencial = cte.)

A una tubería horizontal. (fig. 3.1).

Pueden verse los valores de las presiones a lo largo de la tubería en una placa orificio o diafragma. Si P_a, P_c, V_a, V_c son las presiones absolutas y velocidades en la zona anterior a la placa donde el fluido llena todo el conducto y en la vena contraída respectivamente, y S_a, S_c son las secciones correspondientes, resulta:

$$\frac{V_a^2}{2} + \frac{P_a}{\rho_0} = \frac{V_c^2}{2} + \frac{P_c}{\rho_0} \quad \text{y} \quad S_a V_a = S_c V_c$$

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Siendo ρ_0 la densidad (masa por unidad de volumen) del fluido, habiendo supuesto que ρ_0 no varía en toda la longitud estudiada de la vena”.

De aquí se obtiene:

$$V_c^2 - \frac{S_c^2 V_c^2}{S_a^2} = 2 \left(\frac{P_a - P_c}{\rho_0} \right)$$

Y llamando d = diámetro del orificio en m

D = diámetro interior de la tubería aguas arriba, en m

$$V_c = \sqrt{\frac{\frac{P_a - P_c}{\rho_0} 2}{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}}$$

Y llamando β a la relación de diámetros $\beta = d/D$, resulta:

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{P_a - P_c}{\rho_0} 2}$$

Y llamando $E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}$ coeficiente de velocidad de acercamiento resulta:

$$V_c = E \sqrt{\frac{P_a - P_c}{\rho_0} 2}$$

Y el caudal en volumen será:

$$Q_v = S_c V_c = E \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0}} \quad \frac{m^3}{s}$$

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

$$K = \sqrt{\frac{h}{\rho_0}} \frac{m^3}{s}$$

Y el caudal en peso:

$$Q_m = E \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2(P_a - P_c)} \rho_0 \quad \text{Kg/s}$$

De este modo:

$$P_r = \frac{P}{P_c} \qquad T_r = \frac{T}{T_c}$$

Y la ecuación reducida es:

$$P_r V_r = Z n R T_r$$

$$V_r = \text{Volumen reducido} = \frac{V}{V_c}$$

n = Número de moles de gas.

R = Constante general de los gases.

Z es el coeficiente de compresibilidad que corrige directamente la densidad del gas.

La densidad del gas húmedo se desvía del correspondiente al gas seco de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$W_h = \frac{P_h - f P_v}{P_n} \frac{T_n}{T_h} \frac{1}{Z} w_s + f w_v$$

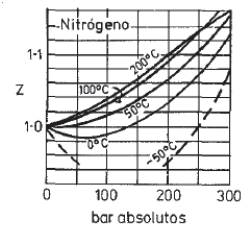
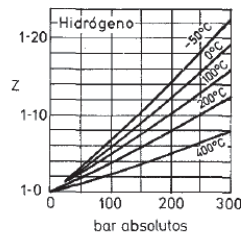
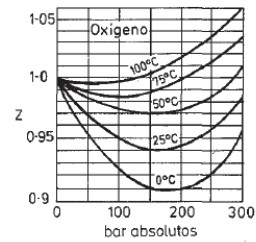
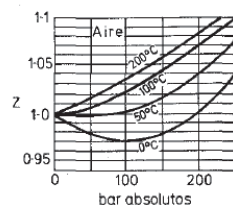
En la que:

W_h = Densidad del gas húmedo en condiciones de servicio en kg/m^3

W_s = Densidad del gas seco en condiciones estándar en kg/m^3

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

- W_v = Peso específico del vapor saturado en las condiciones de servicio en kg/m^3 .
- P_h = Presión absoluta del gas húmedo en bar.
- P_n = Presión absoluta del gas seco en condiciones estándar (1 atm) = 1.013 bar.
- P_v = Presión absoluta del vapor saturado en las condiciones de medida en bar.
- T_h = Temperatura absoluta del gas húmedo ($273^\circ + t$ °K)
- T_n = Temperatura absoluta del gas seco en condiciones estándar = 288°K
- Z = Coeficiente de compresibilidad.
- f = Humedad relativa.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Elemento	Presión Crítica P_0		Temperatura crítica T_0	
	Psi	Bar (Abs.)	°F	°C
Acetona	691	58.0	612	322
Aire	547	37.8	-222	-141
Dióxido de Carbono	1072	74.0	88	31
Helio	33.2	2.29	-450	-268
Hidrógeno	188	13.0	-400	-240
Nitrógeno	492	34.0	-233	-147
Oxígeno	730	50.4	-182	-119

Depende de la relación de diámetros y de la situación del elemento en la tubería conjuntamente con los tramos rectos y accesorios que se encuentren aguas arriba y aguas abajo del elemento.

Hay que señalar que en la medida de caudales de líquidos se emplea normalmente una presión diferencial de 2500 mm c. de a.

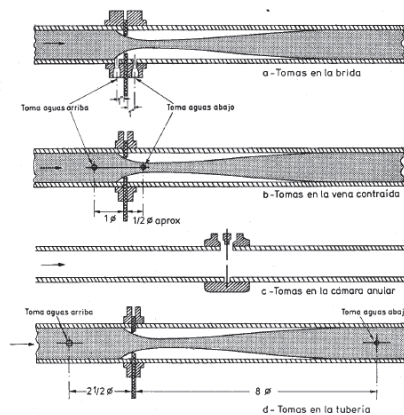
6.3.1.1.2 Elementos de presión diferencial.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Los elementos de presión diferencial son los siguientes:

(15) “La **placa-orificio o diafragma** consiste en una placa perforada instalada en la tubería. Dos tomas conectadas en la parte anterior y posterior de la placa, captan esta presión diferencial la cual es proporcional al cuadrado del caudal. La disposición de las tomas puede verse en la figura 3.5”.



Tomas en la brida (flange taps) (fig. 3.5 a). Es bastante utilizada porque su instalación es cómoda ya que las tomas están taladradas en las bridas que soportan la placa y situadas a 1" de distancia de la misma.

Tomas en la tubería (pipe taps). Las tomas anterior y posterior están situadas a $2\frac{1}{2}$ y 8ϕ , respectivamente. Se emplean cuando se desea aumentar el intervalo de medida de un medidor de caudal dado. La situación de las tomas está en un lugar menos sensible a la medida. La precisión obtenida con la placa es del orden de ± 1 a $\pm 2\%$. La tobera está situada en la tubería con dos tomas, una anterior y la otra en el centro de la sección más pequeña. La tobera permite caudales 60 % superiores a los de la placa-orificio en las mismas condiciones de servicio. Su pérdida de carga es de 30 a 80 % de la presión

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

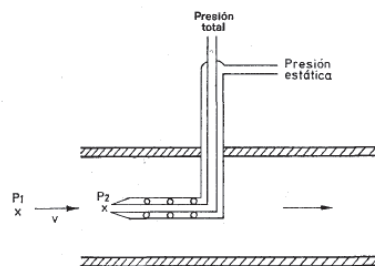
diferencial. Puede emplearse para fluidos que arrastren sólidos en pequeña cantidad, si bien, si estos sólidos son abrasivos, pueden afectar la precisión del elemento. El coste de la tobera es de 8 a 16 veces el de un diafragma y su precisión es del orden de $\pm 0,95$ a $\pm 1,5$ %.

El tubo Venturi (fig. 3.6 c) permite la medición de caudales 60 % superiores a los de la placa orificio en las mismas condiciones de servicio y con una pérdida de carga de sólo 10 a 20 % de la presión diferencial. Posee una gran precisión y permite el paso de fluidos con un porcentaje relativamente grande de sólidos, si bien, los sólidos abrasivos influyen en su forma afectando la exactitud de la medida.

El coste del tubo Venturi es elevado, del orden de 20 veces el de un diafragma y su precisión es del orden de ± 0.75 %.

6.3.1.1.3 Tubo Pitot

(16) “El tubo Pitot mide la diferencia entre la presión total y la presión estática, o sea, la presión dinámica, la cual es proporcional al cuadrado de la velocidad (fig. 3.7).”



La ecuación correspondiente es:

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

$$\frac{P_2}{\rho} = \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2}$$

En la que:

P_2 = Presión de impacto o total absoluta en el punto donde el líquido anula su velocidad.

P_1 = Presión estática absoluta en el fluido.

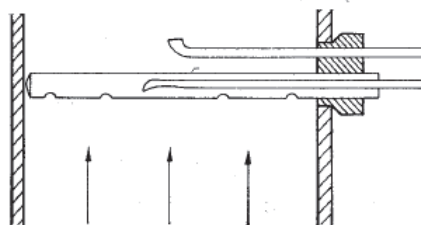
ρ = Densidad;

V_1^2 = Velocidad del fluido en el eje del impacto.

El tubo Pitot es sensible a las variaciones en la distribución de velocidades en la sección de la tubería, de aquí que en su empleo es esencial que el flujo sea laminar disponiéndolo en un tramo recto de tubería. La máxima exactitud en la medida se consigue efectuando varias medidas en puntos determinados y promediando las raíces cuadradas de las velocidades medidas. Su precisión es baja, del orden de 1.5 - 4 % y se emplea normalmente para la medición de grandes caudales de fluidos limpios con una baja pérdida de carga.

6.3.1.1.4 Tubo Annubar

El tubo Annubar (fig. 3.8) es una innovación del tubo Pitot y consta de dos tubos, el de presión total y el de presión estática.



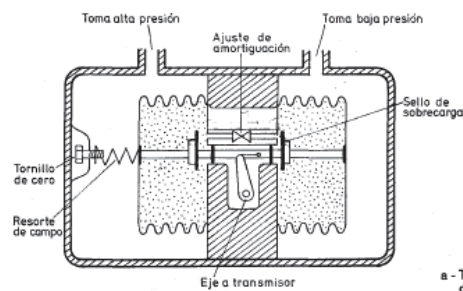
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

El tubo que mide la presión total está situado a lo largo de un diámetro transversal de la tubería y consta de varios orificios de posición crítica determinada por computador, que cubren cada uno la presión total en un anillo de área transversal de la tubería. Permite obtener una gama de variaciones de caudal mucho más amplia que puede llegar hasta la relación 50 a 1, mientras que en la placa-orificio viene limitada por la relación 3 a 1.

6.3.1.1.5 Transmisores de fuelle y de diafragma.

(16) “La presión diferencial creada por la placa, la tobera o el tubo Venturi, puede medirse con un tubo en U de mercurio o bien, transmitirse con los instrumentos llamados convertidores diferenciales.

Los **transmisores de fuelle** (fig. 3.9 a) contienen dos cámaras para la alta y la baja presión. La alta presión comprime el fuelle correspondiente, arrastrando la palanca de unión, el cable y un eje exterior, cuyo movimiento actúa sobre el transductor neumático o eléctrico.”

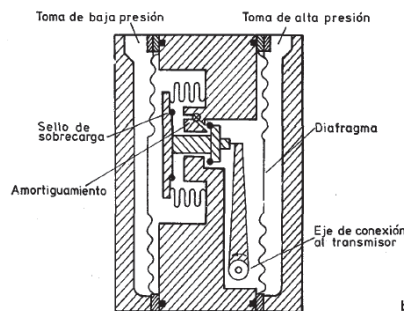


Un muelle de margen permite disponer de varias gamas de presión diferencial. La protección contra sobrecargas está asegurada por dos anillos de sello que cierran herméticamente el paso del líquido de llenado de un fuelle al otro, e impiden su

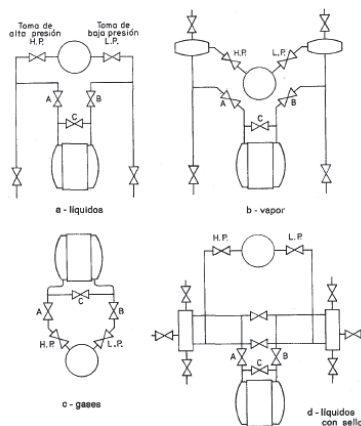
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

destrucción ante una maniobra incorrecta. Otro accesorio es una válvula contra pulsaciones de caudal que restringe el paso del líquido de llenado entre los fuelles.

(17) “Los **transmisores de diafragma** (fig. 3.9 b) se diferencian de los anteriores en que la separación entre las dos cámaras se efectúa mediante diafragmas, en lugar de fuelles, con lo cual el desplazamiento volumétrico es casi nulo”.



El cuerpo de estos transmisores suele ser de acero al carbono, acero inoxidable o aluminio, el fuelle o diafragma de acero inoxidable 316 (disponible también en Monel, Hastelloy C, Teflón en inoxidable o Kel-F en monel) y el líquido de llenado silicona. Las conexiones entre la toma del diafragma y el convertidor de presión diferencial deben ser adecuadas al fluido a medir (fig. 3.10).



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Si el fluido es corrosivo o viscoso, o bien condensa o se evapora, o bien se congela o solidifica, es necesario utilizar sistemas de sello que aislen el instrumento del proceso. Un caso típico es la medida de caudal de vapor en la que el fluido de sello es el propio condensado del vapor. En otros casos suele emplearse una mezcla de 50 % de glicerina y 50 % de agua.

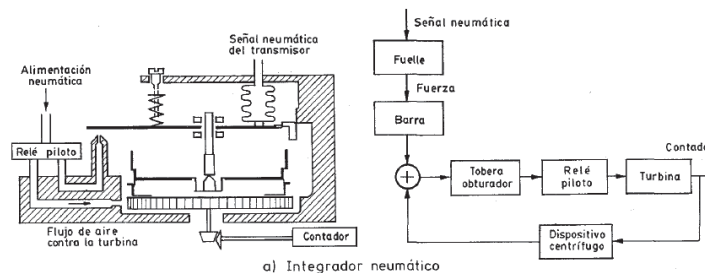
6.3.1.1.6 Integradores.

(18) “Los instrumentos transmisores o registradores de caudal miden realmente una presión diferencial y como el caudal varía según la raíz cuadrada de la presión diferencial, el gráfico deberá ser de raíz cuadrada a no ser que se utilice un extractor de raíz cuadrada intermedio, y estará graduado normalmente de 0-10 con un factor de conversión para poder leer directamente en unidades de caudal.

En ocasiones, desde el punto de vista de contabilización de caudales para propósitos de facturación o de balance energético de la planta, interesa integrar el caudal de un gráfico.

Esto se consigue con integradores mecánicos, neumáticos o electrónicos (fig. 3.11).

Su precisión es del orden de $\pm 2\%$ ”.



La compensación automática se logra con un instrumento multiplicador-divisor de las tres variables, presión diferencial, presión y temperatura.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.3.1.2 Área variable (rotámetros).

Los rotámetros son medidores de caudal de área variable en los cuales un flotador cambia su posición dentro de un tubo proporcionalmente al flujo del fluido. Las fuerzas que actúan sobre el flotador se representan en la figura 3.12.



(19) “En las condiciones de equilibrio se cumplen las ecuaciones:

$$G = v_f \rho_f g$$

$$F = v_f \rho_t g$$

$$E = C_d \rho_t A_f \frac{v^2}{g}$$

$$F + E = G$$

En las que:

G = Peso del flotador.

v_f = Volumen del flotador.

ρ_f = Densidad del flotador.

ρ_t = Densidad del fluido.

E = Fuerza de arrastre del fluido sobre el flotador.

F = Fuerza de empuje del fluido sobre el flotador.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

C_d = Coeficiente de arrastre del fluido sobre el flotador.

v = Velocidad del fluido.

A_f = Área de la sección del flotador.

A_w = Sección interior del tubo.

Resolviendo las ecuaciones anteriores, resulta:

$$v = \sqrt{\frac{2gv_f(\rho_f - \rho_t)}{C_d \rho_t A_t}}$$

Por estos motivos la selección del tamaño de un rotámetro es laboriosa y es conveniente emplear algún método que simplifique los cálculos anteriores”.

Con el fin de normalizar los cálculos se acostumbra a referir los caudales del líquido o del vapor y gas a sus equivalentes en agua y aire respectivamente. Se utilizan las siguientes ecuaciones:

Caudal de líquido:
$$Q_t = C A_w \sqrt{\frac{2gv_f(\rho_f - \rho_t)}{\rho_t A_t}}$$

Caudal equivalente en agua:
$$Q_{agua} = C A_w \sqrt{\frac{2gv_f(8.04-1)}{1A_t}}$$

Habiendo considerado un flotador de acero inoxidable 316 de densidad 8.04; dividiendo ambas ecuaciones y despejando el caudal equivalente en agua resulta:

$$Q_{agua} = Q_1 \sqrt{\frac{\rho_t 7.04}{\rho_f - \rho_t}}$$

Análogamente, para un gas a t °C y P mm Hg, y despreciando ρ_g en el término $\rho_f - \rho_t$ resulta:

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

$$Q_{aire} \left(\frac{Nm^3}{minuto} \right) = Q_g \left(\frac{Nm^3}{minuto} \right) \sqrt{\rho_g \frac{T}{288} \frac{760}{P} \frac{8.04}{\rho_t}}$$

En la que:

ρ_g = Densidad del gas referida al aire a 15°C y 760 mm Hg.

T = Temperatura absoluta del gas (273 + t).

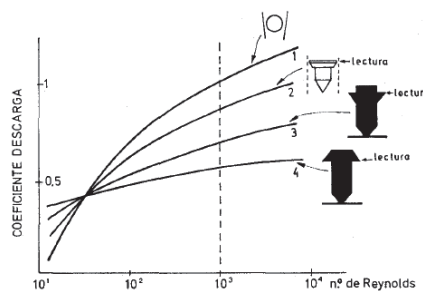
P = Presión absoluta del gas en mm Hg (p + 760).

Y en el caso de vapor:

$$Q_{aire} \left(\frac{Nm^3}{minuto} \right) = Q_{vapor} \left(\frac{kg}{minuto} \right) 256 \sqrt{\frac{v_g}{\rho_t}}$$

En la que v_g es el volumen específico del vapor de agua en las condiciones de servicio, y el caudal de vapor está expresado en masa.

La figura 3.13 indica la influencia que la viscosidad del fluido puede tener en el coeficiente de descarga del rotámetro, señalando las características relativas de independencia de cada tipo de flotador.



El material más empleado en los flotadores es el acero inoxidable 316. En las tablas 3.2 y 3.3 se indican las densidades de los materiales comunes empleados en los flotadores normales y esféricos respectivamente.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Materiales comunes de flotadores normales		Materiales comunes de flotadores esféricos.	
Aluminio	2.72	Aluminio	2.72
Bronce	8.78	Zafiro	4.03
Monel	8.84	Acero Inoxidable 304	7.92
Acero inoxidable 316	8.04	Monel	8.84
Plomo	11.38	Carboloy	14.95
Teflón	2.20	Tantalio	16.60
Titanio	4.50	Vidrio de borosilicato	2.20

Hay que señalar que la amplitud de medida de los rotámetros es de 10 a 1.

La pérdida de carga del rotámetro es constante en todo el recorrido del flotador y puede hacerse muy baja mediante una forma adecuada de éste. La pérdida de carga del flotador puede determinarse a partir de la expresión siguiente que relaciona el peso efectivo del flotador con su sección transversal máxima:

$$\Delta p = \frac{G_f - v_f \rho_1 g}{A_f}$$

Expresión en la que:

G_f = Peso del flotador.

v_f = Volumen del flotador.

ρ_1 = Densidad del fluido.

A_f = Sección transversal máxima del flotador.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

A esta pérdida de carga hay que sumar la debida a las conexiones y al tubo para obtener la pérdida de carga total. El valor aproximado de ésta es el doble de la del flotador.

Variación en las densidades del flotador y del fluido:

$$\text{Factor en un líquido: } K_v = \frac{Q_2}{Q_1} = \sqrt{\frac{(\rho_f - \rho_{l2})\rho_{l1}}{(\rho_f - \rho_{l1})\rho_{l2}}}$$

En el caso de un gas, su densidad puede despreciarse frente al peso específico del flotador, de modo que el factor correspondiente es:

$$\text{Factor en un gas: } K_v = \sqrt{\frac{\rho_{r2} \rho_{g1}}{\rho_{r1} \rho_{g2}}}$$

En las que Q_1 son las condiciones de calibración y Q_2 las nuevas condiciones de servicio y se supone el mismo coeficiente de descarga en ambos casos.

(20) “Variación en la temperatura: En los líquidos, los cambios en la temperatura hacen variar la densidad del líquido, luego:

$$\text{Factor en un líquido: } K_t = \sqrt{\frac{(\rho_f - \rho_{l2})\rho_{l1}}{(\rho_f - \rho_{l1})\rho_{l2}}}$$

En un gas la densidad varía inversamente a la temperatura absoluta, luego:

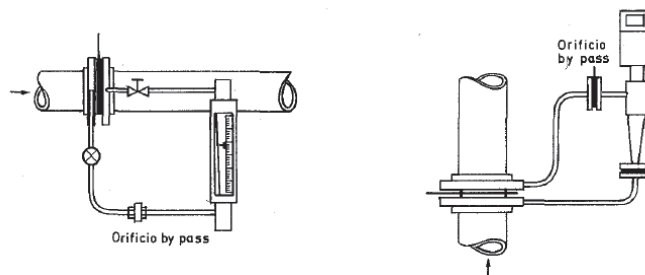
$$\text{Factor en un gas: } K_t = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \text{ expresado en unidades de volumen.}$$

Variación en la presión: En un líquido no influye por ser el líquido incompresible, en cambio en los gases la densidad varía directamente con la presión absoluta, luego:

$$\text{Factor en un gas: } K_p = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}}$$

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

La calibración de los rotámetros se consigue básicamente manteniendo constante el paso de un caudal a través del rotámetro y midiendo la cantidad de líquido o de gas recogido en un tiempo dado medido con precisión. En los líquidos, los aparatos de medida del volumen suelen ser buretas graduadas o básculas mientras que en los gases se suelen utilizar gasómetros y calibradores, graduados con sello de mercurio. Para medir el tiempo se emplean cronómetros capaces de medir 0.01 segundos como mínimo. Según la aplicación, los rotámetros pueden dividirse en rotámetros de purga, de indicación directa para usos generales y armados con indicación magnética y transmisión neumática y electrónica (fig.3.14)''.



6.3.1.3 Velocidad.

6.3.1.3.1 Vertederos y Venturi.

El vertedero debe formar un ángulo recto con la dirección del caudal y el canal aguas arriba debe ser recto como mínimo en una distancia de 10 veces la anchura. La diferencia de alturas debe medirse en un punto aguas arriba lo suficientemente alejado como para no ser influido por la curva de bajada de la superficie del agua y es conveniente incluso utilizar un pozo de protección (tubería de ϕ ligeramente mayor que el flotador) para el flotador del instrumento de medida, caso de utilizar este sistema.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

El caudal es proporcional a la diferencia de alturas según la fórmula general empírica:

$$Q = KIH^n$$

Q = Caudal en m³/s.

K = Constante que depende del tipo de vertedero.

l = Anchura de la garganta del vertedero en m.

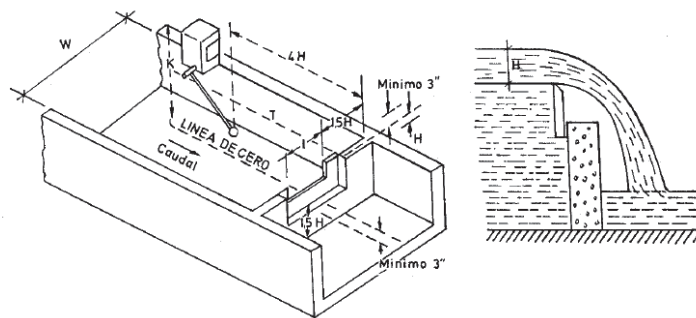
H = Diferencia máxima de alturas en m.

n = Exponente que depende del tipo de vertedero o canal.

Los vertederos más empleados son de los siguientes tipos (fig. 3.15):

Rectangular (fig. 3.15 a) con contracción lateral, simple y fácil de construir y el más económico. Es apto para la medida de caudales de 0-60 m³/h a 0-2000 m³/h. La fórmula de medida de caudales que suele usarse es la de Francis:

$$Q = 1.84(l - 0.2 H)H^{\frac{3}{2}} \frac{m^3}{s}$$

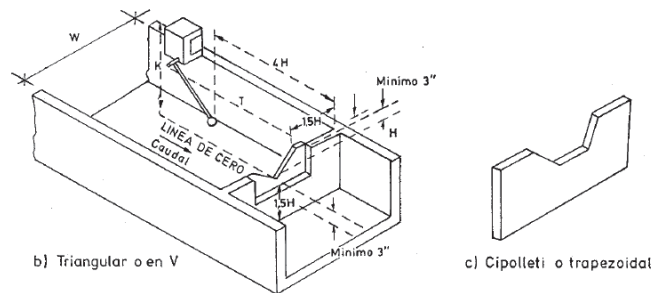


Siendo l anchura del rectángulo en m.

El valor de $0.2 H$ viene sustituido por $0.1 H$ si no hay contracción del manto vertido, es decir, si $l =$ anchura del canal.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

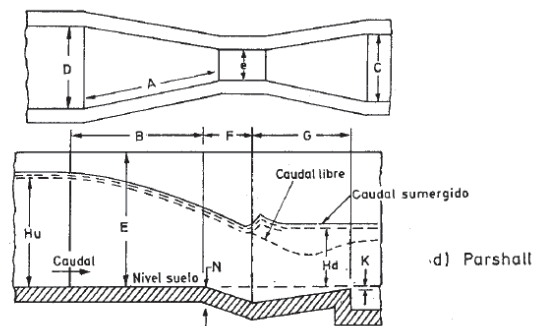
Triangular o en V (fig. 3.15 b), que consiste en una placa con un corte en V de vértice dirigido hacia abajo y con cada lado igualmente inclinado respecto a la vertical. A igualdad de tamaño, su campo de medida es más amplio que el de los otros vertederos.



Es capaz de medir caudales dentro del intervalo 0-30 m³/h a 0-2300 m³/h. La fórmula empírica aplicable es:

$$Q = 1.33 H^{2.475} \text{ m}^3/\text{s} \text{ para un vertedero en V de } 90^\circ.$$

El vertedero Parshall o Venturi (fig. 3.15 d) se emplea normalmente en aquellas aplicaciones en las que un vertedero normal no es siempre adecuado tal como ocurre cuando el líquido transporta sólidos o sedimentos en cantidad excesiva, o bien cuando no existe altura de presión suficiente, o bien cuando no es posible construir un tramo recto de longitud suficiente (un mínimo de 10 veces la anchura del canal).



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.3.1.3.2 Turbinas.

Los medidores de turbina consisten en un rotor que gira al paso del fluido con una velocidad directamente proporcional al caudal. La velocidad del fluido ejerce una fuerza de arrastre en el rotor; la diferencia de presiones debida al cambio de área entre el rotor y el cono posterior ejerce una fuerza igual y opuesta. De este modo el rotor está equilibrado hidrodinámicamente y gira entre los conos anterior y posterior sin necesidad de utilizar rodamientos axiales evitando así un rozamiento que necesariamente se produciría. Existen dos tipos de convertidores para captar la velocidad de la turbina. En el de reluctancia la velocidad viene determinada por el paso de las palas individuales de la turbina a través del campo magnético creado por un imán permanente montado en una bobina captadora exterior.

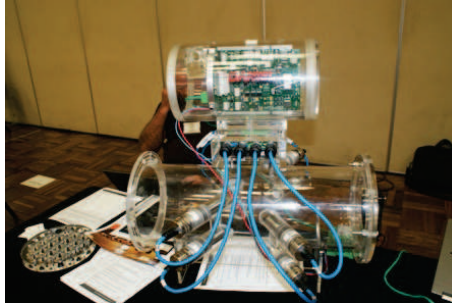
En ambos casos, la frecuencia que genera el rotor de turbina es proporcional al caudal siendo del orden de 250 a 1200 ciclos por segundo para el caudal máximo. Por ejemplo, si un rotor de seis palas gira a 100 revoluciones por segundo, genera 600 impulsos por segundo. El número de impulsos por unidad de caudal es constante

6.3.1.3.3 Transductores ultrasónicos.

Los transductores de ultrasonidos miden el caudal por diferencia de velocidades del sonido al propagarse éste en el sentido del flujo del fluido y en el sentido contrario. Los sensores están situados en una tubería de la que se conocen el área y el perfil de velocidades.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

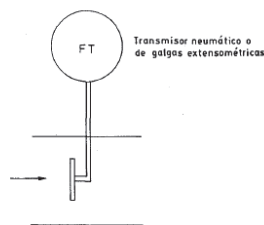
Los principios de funcionamiento de estos instrumentos son variados.



Método Doppler. Se proyectan ondas sónicas a lo largo del flujo del fluido y se mide el corrimiento de frecuencia que experimenta la señal de retorno al reflejarse el sonido en partículas contenidas en el fluido. El método viene limitado por la necesidad de la presencia de partículas, pero permite medir algunos caudales de fluidos difíciles tales como mezclas gas-líquido, fangos, etc. Los transductores sónicos tienen una precisión de $\pm 2\%$ y un intervalo de medida de caudales de 20 a 1 con una escala lineal.

6.3.1.4 Fuerza (medidor de placa)

(21) “El medidor de placa (fig. 3.17) consiste en una placa instalada directamente en el centro de la tubería y sometida al empuje del fluido. La fuerza originada es proporcional a la energía cinética del fluido y depende del área anular entre las paredes de la tubería y la placa”.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

La precisión en la medida es de $\pm 1 \%$. El instrumento permite el paso de fluidos con pequeñas cantidades de sólidos en suspensión y puede medir caudales que van de un mínimo de 0.3 lt/min hasta 40 000 lt/min.

6.3.1.5 Tensión inducida (medidor magnético).

6.3.1.5.1 Medidor magnético de caudal.

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

La fórmula del caudal que da la ley de Faraday es la siguiente:

$$E_s = KBlv$$

E_s = Tensión generada en el conductor.

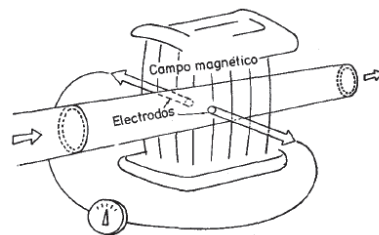
K = Constante.

B = Densidad del campo magnético.

l = Longitud del conductor.

v = Velocidad del movimiento.

En el medidor magnético de caudal (fig.3.18) el conductor es el líquido y E_s . Es la señal generada, esta señal es captada por dos electrodos rasantes con la superficie interior del tubo y diametralmente opuestos”.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Las medidas de caudales en ambos sentidos, de paso del fluido, pueden efectuarse de dos formas:

- a) Con un interruptor que invierta las conexiones de la señal del receptor, la posición del interruptor indica el sentido del caudal, y la calibración del sistema permanece invariable en cualquier sentido.
- b) Elevando el cero del instrumento al 50 % de la escala, en cuyo caso, el índice indica automáticamente el sentido del caudal del líquido, al estar en la zona superior o inferior de la escala. La calibración del sistema permanece invariable y la indicación es de $50 - 0 + 50$ % de la escala en lugar de $0 - 100$ por 100.

Al medidor magnético de caudal se le pueden acoplar instrumentos para conseguir las siguientes funciones auxiliares, que también puede aportar directamente el convertidor a microprocesador:

- Indicación con una escala lineal de 0-100 % de la escala.
- Transmisión neumática.
- Transmisión electrónica.
- Transmisión telemétrica con un transmisor de impulsos.
- Autocomprobación automática con diagnóstico de fallo.
- Módulo de comunicaciones.
- Integración.
- Registro.

Materiales de los electrodos.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Material	Resistencia a la corrosión	Resistencia a la abrasión.
Acero inoxidable 316	Buena	Media
Platino	Excelente	Pobre.
Monel	Buena	Media

Resistencia a la corrosión y abrasión de varios revestimientos.						
Revestimiento	Resistencia a la abrasión		Resistencia a la Corrosión	Bar	Temperatura máxima admisible °C	Aplicaciones
	Media	Severa				
Teflón	Buena	Pobre	Excelente	100-210	300	Ácidos, licores, cerveza.
Poliuretano	Excelente	Excelente	Vulnerable	100-210	150	Fangos, aguas negras.
Neopreno	Excelente	Buena	Media	100-210	170	Agua natural y tratada.
Vidrio	Pobre	Pobre	Excelente			Ácidos, bases, productos alimenticios.
Fibra de vidrio	Media	Pobre	Excelente	50-150	250	Pasta de papel, aguas negras.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

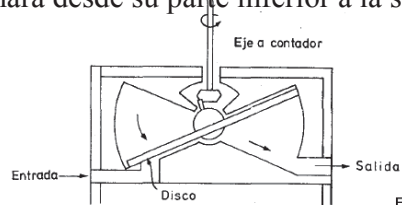
6.3.1.6 Desplazamiento positivo.

Los medidores de desplazamiento positivo miden el caudal en volumen contando o integrando volúmenes separados del líquido. Las partes mecánicas del instrumento se mueven aprovechando la energía del fluido y dan lugar a una pérdida de carga. Existen cuatro tipos básicos de medidores:

- Disco oscilante.
- Pistón oscilante.
- Pistón alternativo.
- Rotativos.
- Diafragma.

6.3.1.6.1 Medidor de disco oscilante.

(23) “El instrumento dispone de una cámara circular con un disco plano móvil dotado de una ranura en la que está intercalada una placa fija. Esta placa separa la entrada de la salida e impide el giro del disco durante el paso del fluido. La cara baja del disco está siempre en contacto con la parte inferior de la cámara en el lado opuesto. Cuando pasa el fluido, el disco toma un movimiento parecido al de un trompo caído de modo que cada punto de su circunferencia exterior sube y baja alternativamente estableciendo contacto con las paredes de la cámara desde su parte inferior a la superior. (fig. 3.19)”.

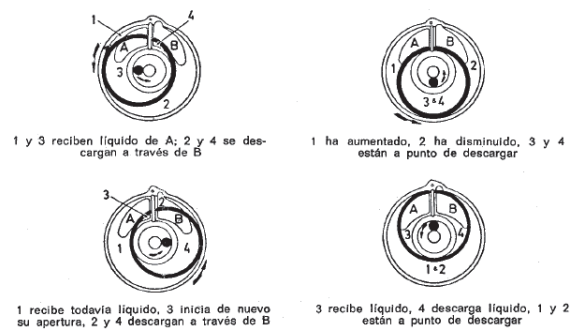


CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

La precisión es de $\pm 1-2\%$. El caudal máximo es de 600 l/min y se fabrica para pequeños tamaños de tubería.

6.3.1.6.2 Medidor de pistón oscilante

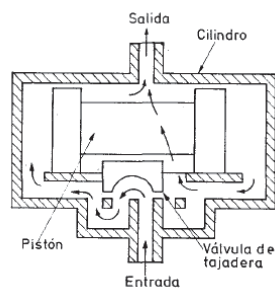
El instrumento (fig.3.20) se compone de una cámara de medida cilíndrica con una placa divisora que separa los orificios de entrada y de salida. La única parte móvil es un pistón cilíndrico que oscila suavemente en un movimiento circular entre las dos caras planas de la cámara, y que está provisto de una ranura que desliza en la placa divisora fija que hace de guía del movimiento oscilante.



Se aplican en la medición de caudales de agua y de líquidos viscosos o corrosivos.

6.3.1.6.3 Medidor de pistón alternativo.

El medidor de pistón convencional (fig. 3.21) es el más antiguo de los medidores de desplazamiento positivo. El instrumento se fabrica en muchas formas: de varios pistones, pistones de doble acción, válvulas rotativas, válvulas deslizantes horizontales.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

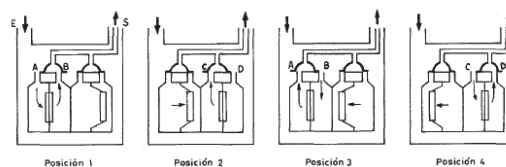
Estos instrumentos se han empleado mucho en la industria petroquímica y pueden alcanzar una precisión del orden de $\pm 0.2\%$. Su capacidad es pequeña comparada con los tamaños de otros medidores. Su costo inicial es alto, dan una pérdida de carga alta y son difíciles de reparar.

6.3.1.6.4 Medidor rotativo.

(24) “Este tipo de instrumento tiene válvulas rotativas que giran excéntricamente rozando con las paredes de una cámara circular y transportan el líquido en forma incremental de la entrada a la salida. Se emplean mucho en la industria petroquímica para la medida de crudos y de gasolina con intervalos de medida que van de unos pocos l/min de líquidos limpios de baja viscosidad hasta 64000 lt/min de crudos viscosos”.

6.3.1.6.5 Medidor de paredes deformables.

El contador de paredes deformables o de membrana o de fuelle, está formado por una envoltura a presión con orificios de entrada y salida que contiene el grupo medidor formado por cuatro cámaras de medición. En la figura 3.25 puede verse este tipo de medidor.



Su funcionamiento es el siguiente:

En la posición 1, el gas que entra a través del orificio E, pasa por A empujando la membrana hacia la derecha y extrayendo el gas que pasa por B hacia S. A continuación,

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

la membrana derecha se desplaza hacia la izquierda, entrando gas por D y saliendo por C (posición 2) En la posición 3, el gas entra por el compartimento de la izquierda por B desplazando la membrana a la izquierda y sale por A. En la posición 4, el gas entra en el compartimento de la derecha por C y sale por D. Su precisión es del orden del $\pm 0,3 \%$.

6.3.1.6.6 Accesorios.

Los medidores de desplazamiento positivo que se han descrito pueden tener acoplados varios tipos de transductores:

Transductor de impulsos por microrruptor eléctrico o neumático en que el eje del medidor acciona un interruptor por medio de una leva. El interruptor está conectado a un contador electromecánico de baja velocidad.

Transductor de impulsos por sensor magnético que utiliza un rotor con unos pequeños imanes embebidos en él y un captador magnético situado en el exterior de la caja del rotor.

Transductor de impulsos fotoeléctrico que genera una onda cuadrada que varía de 0 a 10 V. Consiste en una lámpara de filamento, un disco con sectores alternativamente opacos y translúcidos y una fotocélula. Combinados con estos transductores se encuentran otros tipos de accesorios:

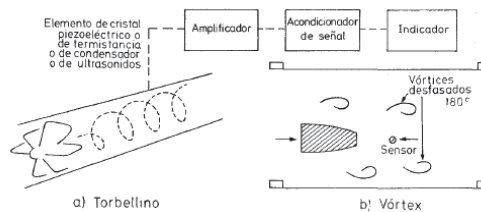
- Convertidor de frecuencia-tensión.
- Convertidor de frecuencia-corriente.
- Totalizador electromecánico con reset manual.
- Totalizador electromecánico con pre-determinador para procesos discontinuos.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

- Totalizador neumático con programador para procesos discontinuos.
- Módulo de comunicaciones.

6.3.1.6.7 Torbellino y Vórtex.

El medidor de caudal por torbellino (fig. 3.26) se basa en la determinación de la frecuencia del torbellino producido por una hélice estática situada dentro de la tubería a cuyo través pasa el fluido (líquido o gas).



La frecuencia del torbellino es proporcional a la velocidad del fluido de acuerdo con la expresión conocida como número de Strouhal:

Dónde:

$$S_t = \frac{f \times d}{v}$$

S_t = Número de Strouhal.

f = Frecuencia del torbellino.

d = Anchura del torbellino.

v = Velocidad del fluido.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

El número de Strouhal es constante para números de Reynolds comprendidos entre 10000 y 1000000 y d es mantenido constante por el fabricante del medidor, con lo cual, y siendo:

$$Q = s \cdot v$$

Con

Q = Caudal volumétrico del fluido.

s = Sección de la tubería.

Resulta:

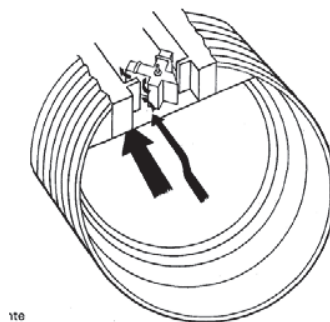
$$Q = \frac{f \cdot d \cdot s}{S_t} = f \cdot k$$

Siendo $K = \frac{(d \cdot s)}{S_t}$ una constante.

Por lo tanto, el caudal volumétrico del fluido es proporcional a la frecuencia del torbellino.

6.3.1.6.8 Oscilante.

Consiste en un pequeño orificio (fig. 3.27) situado en el cuerpo del medidor, que genera una presión diferencial y provoca el paso del fluido por el área de medida. Ésta contiene una válvula oscilante que perturba la circulación del fluido.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

A medida que este flujo turbulento pasa a través de la abertura se crea una zona de baja presión detrás de la válvula, con lo que ésta oscila a una frecuencia directamente proporcional al caudal. Un transductor de impulsos capta las oscilaciones de la válvula e indica el caudal.

Su precisión es del orden del $\pm 0.5 \%$.

6.3.2 Medidores de caudal masa.

La determinación del caudal masa puede efectuarse a partir de una medida volumétrica compensándola para las variaciones de densidad del fluido, o bien de determinar directamente el caudal masa aprovechando características medibles de la masa del fluido.

6.3.2.1 Compensación de variaciones de densidad del fluido en medidores volumétricos.

En los líquidos, como son incompresibles, la densidad varía por los cambios en la temperatura del fluido. Si se instala un transmisor de densidad que mide ésta en condiciones de servicio, bastará aplicar su salida directamente a la salida del transmisor de caudal para tener así el caudal corregido. Recordemos que la fórmula simplificada del caudal de un fluido incompresible es:

$$Q_p = \sqrt{K (p_a - p_c) \rho_0} \quad kg/h$$

Siendo:

K = Constante.

$p_a - p_c$ = Presión diferencial creada por el elemento.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

ρ_0 = Densidad del líquido en condiciones de servicio.

O bien,

$$Q_p^2 = \sqrt{K (p_a - p_c) \rho_0}$$

Así, pues, la señal de presión diferencial $p_a - p_c$ captada por el transmisor correspondiente debe multiplicarse por la señal del transmisor de densidad.

Si el transmisor de densidad mide ésta en condiciones estándar (por ejemplo, a 15°C) la señal de salida correspondiente debe corregirse manual o automáticamente para las variaciones de temperatura de la línea antes de introducirla en el compensador.

6.3.2.2 Medición directa del caudal-masa.

Si bien en la industria se utilizan normalmente medidores volumétricos de caudal, con el caudal determinado en las condiciones de servicio, o bien compensado según la presión, la temperatura o la densidad tal como se ha estudiado anteriormente, en ocasiones interesa aprovechar características medibles de la masa. En este caso existen tres sistemas básicos, los instrumentos térmicos, los de momento angular y los de Coriolis. En menor escala se utilizan los de presión diferencial.

6.3.2.2.1 Medidores térmicos de caudal

Los medidores térmicos de caudal se basan comúnmente en dos principios físicos:

- a) La elevación de temperatura del fluido en su paso por un cuerpo caliente.
- b) La pérdida de calor experimentada por un cuerpo caliente inmerso en el fluido.

De los dos principios, el más utilizado industrialmente es el primero debiendo señalar que el primer instrumento de esta clase fue proyectado por Thomas en 1911 para medir el

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

caudal masa de gas en una tobera. Por este motivo estos aparatos reciben también el nombre de medidores de caudal Thomas. El medidor Thomas consta de una fuente eléctrica de alimentación de precisión que proporciona un calor constante al punto medio del tubo por el cual circula el caudal. En puntos equidistantes de la fuente de calor se encuentran sondas de resistencia para medir la temperatura.

6.3.2.2 Medidores de momento angular.

Los medidores de caudal masa de momento angular se basan en el principio de conservación del momento angular de los fluidos.

Partiendo de la segunda ley de Newton $Z = I\alpha$ en la que

Z = Par.

I = Momento de inercia.

α = Aceleración angular.

Y de las fórmulas $I = mr^2$, $H = Iw$ se llega a

$$\frac{m}{t} = \frac{Z}{wr^2}$$

En las que:

H = Momento angular.

m = Masa.

t = Tiempo.

r = Radio de giro.

w = Velocidad angular.

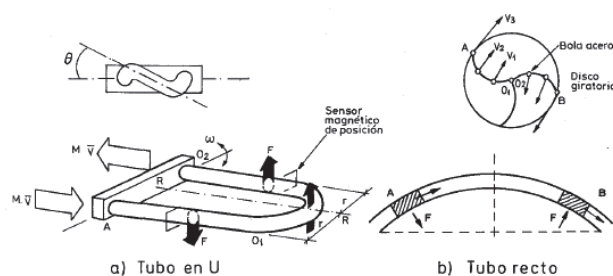
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Luego, si al fluido se le comunica un momento angular, y se mantiene constante la velocidad angular, la medición del par producido permitirá determinar el caudal masa ya que r^2 es constante en el sistema.

6.3.2.2.3 Medidor de Coriolis

(25) “El medidor de Coriolis se basa en el teorema de Coriolis, matemático francés (1795- 1843) que observó que un objeto de masa m que se desplaza con una velocidad lineal. Va través de una superficie giratoria que gira con velocidad angular constante ω , experimenta una velocidad tangencial (velocidad angular X radio de giro) tanto mayor cuanto mayor es su alejamiento del centro. Si el móvil se desplaza del centro hacia la periferia experimentará un aumento gradual de su velocidad tangencial, lo cual indica que se le está aplicando una aceleración y, por lo tanto, una fuerza sobre la masa del objeto. Como el radio de giro va aumentando gradualmente, la velocidad tangencial también varía, con lo que se concluye que una variación de velocidad comporta una aceleración, la que a su vez es debida a una fuerza que actúa sobre la bola. Estas son, respectivamente, la aceleración y la fuerza de Coriolis”.

En la figura 4.54 *a* puede verse el medidor.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

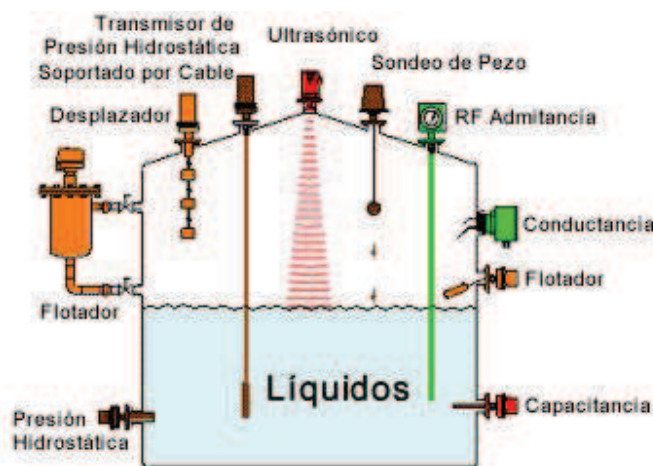
6.4. MEDICIÓN DE NIVEL.

En la industria, la medición de nivel es muy importante, tanto desde el punto de vista del funcionamiento correcto del proceso como de la consideración del balance adecuado de materias primas o de productos finales.

La utilización de instrumentos electrónicos con microprocesador en la medida de otras variables, tales como la presión y la temperatura, permite añadir inteligencia en la medida del nivel, y obtener precisiones de lectura altas, del orden de $\pm 0.2 \%$, en el inventario de materias primas o finales o en transformación en los tanques del proceso.

6.4.1 Medidores de nivel de líquidos.

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



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Los primeros instrumentos de medida directa se dividen en: sonda, cinta y plomada, nivel de cristal e instrumentos de flotador. Los aparatos que miden el nivel aprovechando la presión hidrostática se dividen en:

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

El empuje producido por el propio líquido lo aprovecha el medidor de desplazamiento a barra de torsión. Los instrumentos que utilizan características eléctricas del líquido se clasifican en:

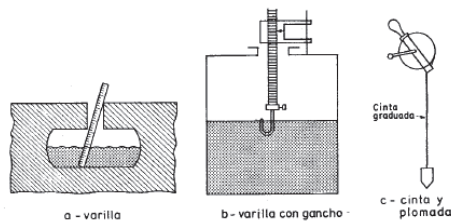
- Medidor resistivo.
- Medidor conductivo.
- Medidor capacitivo.
- Medidor ultrasónico.
- Medidor de radiación.
- Medidor de láser.

6.4.1.1 Instrumentos de medida directa.

(26) “El medidor de sonda (fig. 4.1 a) consiste en una varilla o regla graduada, de longitud conveniente para introducirla dentro del depósito.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

La determinación del nivel se efectúa por lectura directa de la longitud mojada por el líquido”.



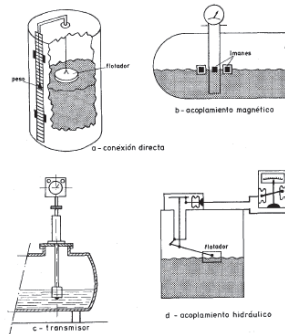
En el momento de la lectura el tanque debe estar abierto a presión atmosférica. Se utiliza generalmente en tanques de fuel-oil o gasolina.

Para mayor seguridad, las válvulas de cierre incorporan una pequeña bola que actúa como válvula de retención en caso de rotura del vidrio. Los niveles de vidrio son susceptibles de ensuciarse por las características del líquido que miden, impidiendo que el nivel pueda apreciarse claramente. Entre los líquidos que presentan este inconveniente figuran el caramelo y los líquidos pegajosos.

El nivel de vidrio permite sólo una indicación local, si bien pueden emplearse espejos para lectura a distancias limitadas o bien utilizar cámaras de televisión para mayores distancias de transmisión. Su ventaja principal es la gran seguridad que ofrece en la lectura del nivel del líquido pudiendo controlar con ellos la lectura de los otros tipos de aparatos de nivel. Los instrumentos de flotador consisten en un flotador situado en el seno del líquido y conectado al exterior del tanque indicando directamente el nivel. La conexión puede ser directa, magnética o hidráulica.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

El **flotador conectado directamente** (fig. 4.3 a) está unido por un cable que desliza en un juego de poleas a un índice exterior que señala sobre una escala graduada.

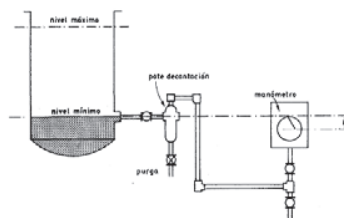


Es el modelo más antiguo y el más utilizado en tanques de gran capacidad tales como los de fuel-oil y gas-oil. Tiene el inconveniente de que las partes móviles están expuestas al fluido y pueden romperse y de que el tanque no puede estar sometido a presión. Además, el flotador debe mantenerse limpio.

6.4.1.2 Instrumentos basados en la presión hidrostática.

(27) “Medidor manométrico. Membrana. Burbujeo. Presión diferencial”.

El medidor manométrico consiste en un manómetro conectado directamente a la parte inferior del tanque. En la figura 4.4 puede verse un instrumento de este tipo en el que se observarán varios accesorios como son una válvula de cierre para mantenimiento, y un pote de decantación con una válvula de purga.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

El manómetro mide la presión debida a la altura de líquido h que existe entre el nivel del tanque y el eje del instrumento. Así pues, el campo de medida del instrumento corresponderá a:

$$0 - h \cdot \gamma \cdot g \quad \text{pascal}$$

Con

h = altura de líquido en m.

γ = densidad del líquido en kg/m^3

g = $9,8 \text{ m/s}^2$

O bien, expresando γ en g/cm^3 se obtendría $0-0.098 h\gamma$ bar.

El **medidor de presión diferencial** consiste en un diafragma en contacto con el líquido del tanque, que mide la presión hidrostática en un punto del fondo del tanque. En un tanque abierto esta presión es proporcional a la altura del líquido en ese punto ya su peso específico (fig. 4.6). Es decir: $P = H\gamma g$ en la que:

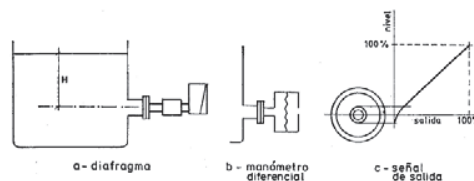
P = Presión.

H = Altura de líquido sobre el instrumento.

γ = Densidad del líquido.

g = $9,8 \text{ m/s}^2$

El diafragma forma parte de un transmisor neumático, electrónico o digital de presión diferencial semejante a los transmisores de caudal de diafragma.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

En tanques cerrados y a presión con líquido de vapor condensable existe el riesgo de obturación de la línea de compensación, en particular si el fluido no es limpio. Para evitarlo puede purgarse la línea con líquido o gas, método que no se recomienda por los problemas de mantenimiento y la posible pérdida de precisión que presenta, o bien emplear un transmisor de presión diferencial unido con dos capilares a dos diafragmas conectados en las partes inferior y superior del tanque. Es importante que los dos diafragmas estén a la misma temperatura para evitar los errores en la medida que se presentarían por causa de las distintas dilataciones del fluido contenido en el tubo capilar.

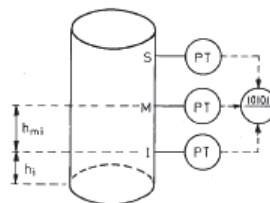
Las medidas calculadas son:

$$\text{Densidad} = \frac{P_{inf} - P_{media}}{h_{mi}}$$

$$\text{Nivel} = \frac{P_i - P_s}{\text{Densidad}} + h_i$$

$$\text{Masa} = (P_i - P_s) \times \text{Área media del tanque}$$

$$\text{Volumen} = \frac{\text{Masa}}{\text{densidad}}$$



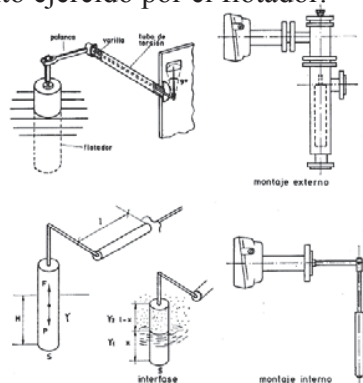
La temperatura media tomada entre la parte inferior y la media del tanque permite corregir la densidad y el volumen calculados. Otros factores que influyen son la

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

configuración del tanque, los asentamientos del tanque en el terreno, las expansiones térmicas y las variaciones de densidad en las capas del líquido. La precisión en la medida de la masa llega al $\pm 0.01 \%$.

6.4.1.3 Instrumento basado en el desplazamiento

El medidor de nivel de tipo desplazamiento (fig. 4.9) consiste en un flotador parcialmente sumergido en el líquido y conectado mediante un brazo a un tubo de torsión unido rígidamente al tanque. El tubo de torsión se caracteriza fundamentalmente porque el ángulo de rotación de su extremo libre es directamente proporcional a la fuerza aplicada, es decir, al momento ejercido por el flotador.



El instrumento puede utilizarse también en la medida de interfase entre dos líquidos inmiscibles de distinta densidad (por ejemplo, agua y aceite). En este caso el flotador es de pequeño diámetro y de gran longitud y está totalmente sumergido. El peso del volumen desplazado por el flotador, es decir, el empuje, se compone entonces de dos partes, del líquido más denso en la parte inferior y del menos denso en la superior, con una línea de separación (interfase) de la que depende el par de torsión proporcionado al transmisor exterior.

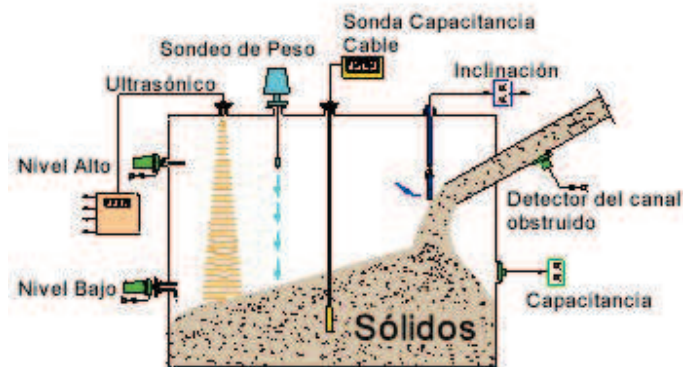
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

La precisión es del orden de $\pm 0.5\%$ a $\pm 1\%$ y el intervalo de medida puede variar de 0-300 a 0 - 2000 mm c. de a.

El instrumento puede utilizarse en tanques abiertos y cerrados a presión o a vacío, tiene una buena sensibilidad pero presenta el inconveniente del riesgo de depósito de sólidos o de crecimiento de cristales en el flotador que afectan a la precisión de la medida y es apto sólo para la medida de pequeñas diferencias de nivel (2000 mm máximo estándar). La medida del nivel de interfases requiere flotadores de gran volumen.

6.4.2 Medidores de nivel de sólidos.

(28) “En los procesos continuos, la industria ha ido exigiendo el desarrollo de instrumentos capaces de medir el nivel de sólidos en puntos fijos o de forma continua, en particular en los tanques o silos destinados a contener materias primas o productos finales.



Los detectores de nivel de punto fijo proporcionan una medida en uno o varios puntos fijos determinados. Los sistemas más empleados son el diafragma, el cono suspendido, la varilla flexible, el medidor conductivo, las paletas rotativas y los ultrasonidos”.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Los medidores de nivel continuo proporcionan una medida continua del nivel desde el punto más bajo al más alto. Entre los instrumentos empleados se encuentran el de peso móvil, el de báscula, el capacitivo, el de presión diferencial, el de ultrasonidos y el de radiación.

6.4.2.1 Detectores de nivel de punto fijo.

El detector de diafragma (fig. 4.10) consiste en una membrana flexible que puede entrar en contacto con el producto dentro del tanque y que contiene en su interior un conjunto de palancas con contrapeso que se apoyan sobre un microinterruptor. Cuando el nivel del sólido alcanza el diafragma lo fuerza venciendo el contrapeso y actuando sobre el microinterruptor; éste que puede ser mecánico o de mercurio, puede accionar una alarma o actuar automáticamente sobre un transportador o maquinaria asociadas al depósito.

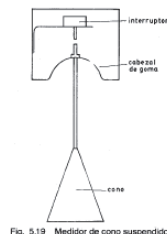
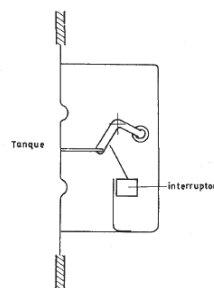


Fig. 5.19 Medidor de cono suspendido.

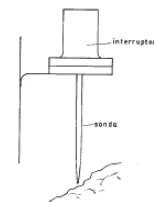


Fig. 5.20 Varilla flexible.

El material del diafragma puede ser de tela, goma, neopreno o fibra de vidrio. El medidor de diafragma tiene la ventaja de su bajo coste, puede emplearse en tanques cerrados sometidos a baja presión o vacío gracias a una línea neumática que iguala presiones a ambos lados de la membrana y trabaja bien con materiales de muy diversa densidad.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Tiene la desventaja de no admitir materiales granulares de tamaños superiores a unos 80 mm de diámetro. Su precisión es de unos ± 50 mm.

La **varilla flexible** (fig. 4.12) consiste en una varilla de acero conectada a un diafragma de latón donde está contenido un interruptor. Cuando los sólidos presionan, aunque sólo sea ligeramente en la varilla, el interruptor se cierra y actúa sobre una alarma.

El conjunto de la unidad está sellado herméticamente pudiendo construirse a prueba de explosión. El aparato se emplea como alarma de alto nivel estando dispuesto en la parte superior del tanque. Para impedir que la simple caída del producto pueda causar una alarma infundada, incorpora un relé de retardo. El instrumento se emplea en tanques abiertos como alarma de nivel alto, tiene una precisión de ± 25 mm, se utiliza para materiales tales como carbón y puede trabajar hasta temperaturas máximas de 300°C .

El **medidor conductivo** (fig. 4.13) consiste en un electrodo dispuesto en el interior de unas placas puestas a masa y con el circuito eléctrico abierto. Cuando los sólidos alcanzan el aparato se cierra el circuito y la pequeña corriente originada es amplificada actuando sobre un relé de alarma. Los sólidos deben poseer una conductividad eléctrica apreciable para poder excitar el circuito.



El instrumento puede utilizarse en tanques abiertos y a presión, trabaja hasta temperaturas máximas de 300°C , está limitado a materiales que tengan una conductividad de 1 a 1.4×10^{-7} mho y sólo puede emplearse como alarma de nivel alto o

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

de niveles intermedios. Entre los materiales en los que se pueden emplear figuran el carbón y el carbón activo.

El **medidor capacitivo** es un detector de proximidad capacitivo, dotado de un circuito oscilante RC, que está ajustado en un punto crítico, y que entra en oscilación cuando se encuentra próximo al lecho del sólido. El aparato se monta en el tanque en posición vertical o inclinada y su sensibilidad se coloca al mínimo para evitar el riesgo de excitación del aparato en el caso de que una mínima cantidad del sólido pueda depositarse en el detector.

El **medidor de radar de microondas** consta de una fuente de microondas, situada a un lado del recipiente, y un detector en el lado opuesto, en la misma horizontal. Cuando el producto alcanza dicha horizontal, la señal deja de recibirse y se excita una alarma. Se aplica en la detección de bajo nivel de sólidos abrasivos.

6.4.2.2 Detectores de nivel continuos.

(29) “El **medidor de nivel de sondeo electromecánico** representado en la figura 4.14 consiste en un pequeño peso móvil sostenido por un cable desde la parte superior del silo mediante poleas. Un motor y un programador situados en el exterior establecen un ciclo de trabajo del peso. Éste baja suavemente en el interior de la tolva hasta que choca contra el lecho de sólidos”.

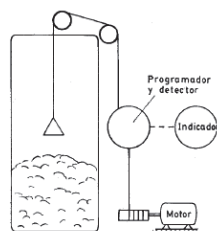


Fig. 524 Medidor de nivel de sondeo electromecánico.

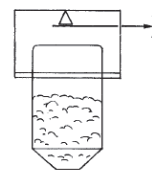


Fig. 525 Medidor de nivel de báscula.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Un indicador exterior señala el punto donde el peso ha invertido su movimiento indicando así el nivel en aquel momento. El instrumento se caracteriza por su sencillez, puede emplearse en el control de nivel, pero debe ser muy robusto mecánicamente para evitar una posible rotura del conjunto dentro de la tolva lo que podría dar lugar a la posible rotura de los mecanismos de vaciado.

El **medidor de nivel de báscula** (fig. 4.15) mide el nivel de sólidos indirectamente a través del peso del conjunto tolva más producto; como el peso de la tolva es conocido, es fácil determinar el peso del producto y por lo tanto el nivel.

La tolva se apoya en una plataforma de carga actuando sobre la palanca de una báscula o bien carga sobre otros elementos de medida neumáticos, hidráulicos o eléctricos (galga extensométrica y microprocesador). Su precisión depende del sensor utilizado pudiendo variar de ± 0.5 a ± 1 % .

El **medidor de nivel capacitivo** es parecido al expuesto en la medición de nivel de los líquidos con la diferencia de que tiene más posibilidades de error por la mayor adherencia que puede presentar el sólido en la varilla capacitiva. Su precisión es de unos ± 15 mm aproximadamente.

El **medidor de presión diferencial** se emplea en la medida y el control continuo del nivel de lechos fluidizados. Un instrumento transmisor neumático o electrónico mide la presión diferencial posterior de los dos orificios mencionados que depende del nivel del

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

lecho fluidizado. El instrumento puede trabajar a temperaturas superiores a 300°C y posee una respuesta rápida.

(30) “El **medidor de nivel de ultrasonidos** consiste en un emisor de ultrasonidos que envía un haz horizontal a un receptor colocado al otro lado del tanque. Si el nivel de sólidos está más bajo que el haz, el sistema entra en oscilación enclavando un relé. Cuando los sólidos interceptan el haz, el sistema deja de oscilar y el relé se desexcita actuando sobre una alarma o sobre la maquinaria de descarga del depósito. Disponiendo el haz de ultrasonidos en dirección vertical, el instrumento puede actuar como indicación continua del nivel midiendo el tiempo de tránsito de un impulso ultrasónico, entre la fuente emisora, la superficie del producto donde se refleja y el receptor situado en la propia fuente.

El **medidor de radar de microondas** consta de una fuente de microondas situada en la parte superior del tanque que emite un haz de microondas que se refleja sobre el sólido y es captado por un detector. El sistema es ideal en productos muy viscosos como el asfalto. Su precisión es de ± 2 mm y su campo de medida puede llegar a 40 metros.

El **medidor de nivel de radiación** es parecido al instrumento estudiado en la determinación del nivel de líquidos. Consiste en una fuente radiactiva de rayos gamma, dispuesta al exterior y en la parte inferior del tanque, que emite su radiación a través del lecho de sólidos siendo captada por un detector exterior.

Su precisión es de ± 1 % y su campo de medida de 0.5 m por cada fuente, pudiendo emplearse varias para aumentar el intervalo de medida del nivel”.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.5. OTRAS VARIABLES DE INSTRUMENTACIÓN.

6.5.1 Variables químicas.

6.5.1.1 Conductividad.

La conductividad es la capacidad de una solución acuosa para conducir una corriente eléctrica. El agua destilada pura no conduce en principio la corriente pero, si se le disuelven sólidos minerales aumenta su capacidad de conducción. Estos sólidos al disolverse se separan en iones positivos y negativos en equilibrio con el cuerpo.



Los iones son susceptibles de desplazarse bajo la acción de un campo eléctrico y también de combinarse con otros iones para formar iones nuevos o cuerpos distintos que ya no se ionizarán. La conductividad de los iones es función de su concentración y de su movilidad de tal modo que dos electrodos a tensión sumergidos en un líquido, en el que existe una sal en solución, por ejemplo ClNa producirán el fenómeno siguiente:

Los iones positivos Na^+ emigrarán al electrodo cargado negativamente, mientras que los iones negativos Cl^- serán atraídos por el electrodo positivo. Al llegar a los electrodos, los

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

iones adquieren cargas de signo contrario y se neutralizan. De este modo se establece una corriente a través de la solución y del circuito eléctrico exterior que depende de:

1. Número y tipo de iones presentes en la solución.
2. Área efectiva de los electrodos.
3. Diferencia de potencial y distancia entre los electrodos.
4. Temperatura de la solución.

Luego, si en una solución de un producto químico dado se mantienen constantes los puntos 2, 3 y 4, la conductividad de la solución dependerá únicamente del número de iones en la solución y si el producto está disociado totalmente será una medida directa de la concentración del mismo en la solución.

La **conductividad eléctrica específica** se define como el recíproco de la resistencia en ohmios, medida entre dos caras opuestas de un cubo de 1 cm de lado sumergido en la solución. La unidad es el mho o siemens (recíproco de ohmio) que es la conductancia de una solución que con una diferencia de potencial de un voltio entre las caras de los electrodos da lugar a la circulación de un amperio. El sistema tiene el inconveniente de que la acumulación gradual de suciedad en los electrodos falsea la medida. Uno de los métodos para compensar los efectos eléctricos de acumulación de suciedad en los electrodos puede verse en la figura principal.

En el esquema se aprecia que si se mantiene constante la diferencia de potencial V_0 entre los electrodos 2 y 3 con independencia de la resistencia de la solución, la corriente I_c mantendrá una relación lineal con la conductividad de la solución.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

En efecto:

$$V_0 = I_c R_2 = I_c \frac{1}{G}$$

O sea $G = \frac{I_c}{V_0}$

Y como V_0 es constante resulta $G = K I_c$

Siendo $K = \frac{1}{V_0}$

Por consiguiente, si el circuito mantiene una diferencia de potencial V_0 constante entre dos electrodos, independientemente de los depósitos de sólidos que se vayan acumulando, la medida será proporcional a I_c con la constante de proporcionalidad igual a la inversa de V_0 . El circuito de la figura principal satisface estos requerimientos: V_0 se compara con la tensión de referencia VR_1 y si hay diferencia, ésta es amplificada por el servoamplificador que excita un motor de equilibrio que mueve a su vez el brazo móvil del reóstato, hasta que el nuevo valor de I_c hace que el producto $I_c R_2 = V_0$ sea igual a $I_c R_1 V$.

La precisión en la medida es de $\pm 0,5\%$ y el campo de medida llega a un máximo de 0-150000 μmhos .

6.5.1.2 pH

El pH es una medida de la acidez o alcalinidad del agua con compuestos químicos disueltos. Su expresión viene dada por el logaritmo de la inversa de la concentración del ion H expresada en moles por litro.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

$$pH = \log \frac{1}{[H^+]}$$

Señalemos que el agua pura neutra tiene una concentración de ion hidrógeno de 10^{-7} moles por litro. Luego el pH será

$$pH = \log \frac{1}{10^{-7}} = 7$$

Una disolución ácida tiene mayor concentración de ion hidrógeno que el agua pura y por lo tanto su pH será menor de 7. Una disolución básica le ocurre a la inversa y su pH será mayor de 7. Las medidas prácticas del pH se encuentran entre los valores 0 a 14.

En la medida de pH pueden utilizarse varios métodos, de entre los cuales los más exactos y versátiles de aplicación industrial son: el sistema de electrodo de vidrio y el de transistor (ISFET-Ion Sensitive Field Effect Transistor).



El electrodo de vidrio consiste en un tubo de vidrio cerrado en su parte inferior con una membrana de vidrio especialmente sensible a los iones hidrógeno del pH.

Los potenciales existentes son los siguientes:

E_1 : Potencial entre el electrodo metálico interior y la solución tampón que puede considerarse constante para una temperatura dada. Las temperaturas extremadamente altas pueden dar lugar a la disolución del revestimiento de cloruro de plata del electrodo.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

E_2 : Caída de potencial entre el electrodo interior y la cara interna de la membrana de cristal que puede considerarse despreciable.

E_3 : Potencial entre solución tampón y superficie de la membrana de cristal que es constante gracias a la estabilidad de la solución tampón y de la membrana de cristal.

E_4 : Caída de potencial a través de la membrana que se mantiene constante en cortos períodos mientras la membrana de cristal no sufra alteraciones de origen químico o mecánico. Si este potencial deriva, se calibra con una solución tampón de pH conocido.

E_5 : Potencial entre superficie exterior de la membrana de cristal y la solución ensayada que varía con la concentración de iones hidrógeno (pH) de la solución ensayada.

E_6 : Caída de potencial a través de la solución ensayada que se considera despreciable, salvo si se trata de agua poco conductora o de soluciones no acuosas.

E_7 : Representa el potencial de la unión líquida entre la solución ensayada y la de referencia. Su valor es despreciable, aunque un atascamiento o un exceso de presión externa contra la unión puede influir en la medición.

E_8 : La caída de potencial dentro del electrodo de referencia es despreciable.

E_9 : Potencial de contacto entre el electrodo de referencia y la solución de Cl K que puede considerarse constante si dicha solución no está contaminada.

En la medición del pH puede presentarse el recubrimiento de los electrodos, en cuyo caso el electrodo se comporta como si apreciara bajas concentraciones de ion H^+ y, por tanto, el instrumento registrador leería altos valores de pH. En estos casos es necesario limpiar periódicamente el electrodo con una frecuencia que la experiencia determina en cada

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

caso. Existen métodos automáticos de limpieza (ultrasonidos, chorro de limpieza, cepillos mecánicos) que todavía no han dado un resultado completamente satisfactorio y dispositivos de extracción manual o automática que permiten la extracción y limpieza del electrodo sin interrumpir el servicio. Los instrumentos de pH tienen una precisión de ± 0.25 a ± 1 %, o bien, ± 0.03 pH.

El microprocesador aporta inteligencia al transmisor de pH, proporcionando insensibilidad a vibraciones, compensación automática de temperatura, autodiagnóstico y una precisión de ± 0.1 %.

6.5.1.3 Redox (potencial de oxidación-reducción).

El potencial de oxidación-reducción de materiales disueltos en agua se mide con un metal noble y un electrodo de referencia, es una medida de su potencial electrónico de equilibrio y de su capacidad relativa para reaccionar con otros materiales oxidantes o reductores que pueden añadirse al agua.



Hay que señalar que en la medida del pH, el electrodo de vidrio capta los cambios en la concentración del ion hidrógeno activo mientras que en la medida del potencial de

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

oxidación-reducción el electrodo de metal noble (normalmente es platino) es sensible a los cambios en la relación entre el agente reductor y el agente oxidante. Así, pues, el electrodo de metal noble puede denominarse electrodo sensible a los electrones de forma paralela al electrodo de vidrio considerado como elemento sensible al ion hidrógeno.

El estándar cero de medida de potencial es el del electrodo de hidrógeno definido como:



Este estándar se aplica en laboratorio; en la industria se utilizan principalmente dos tipos de electrodos:

1. Electrodo de plata/cloruro de plata con electrolito 4NClK de $E_0 = -0,199$ voltios.
2. Electrodo de calomel con electrolito de ClK saturado con $E_0 = -0.244$ voltios.

La medida del potencial de oxidación-reducción viene dada por la diferencia de potencial entre el electrodo de metal noble y el de referencia según la fórmula:

$$ORP = E_h - E_0 = -\frac{RT}{nF} \ln \frac{(Oxido)}{(Reducción)}$$

En la que:

E_h = Potencial de oxidación relativo al electrodo de hidrógeno.

E_0 = Potencial de oxidación del electrodo de referencia relativo al electrodo de hidrógeno.

R = Constante de los gases perfectos.

T = Temperatura absoluta.

n = Número de electrones transferidos.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

F = Carga de Faraday

(Oxid) = Concentración del material en forma oxidante.

(Red) = Concentración del material en forma reductora.

Los instrumentos amplificadores e indicadores o registradores de Redox, utilizan la misma construcción y los mismos circuitos básicos que los instrumentos de pH. Su precisión es de $\pm 1\%$ o de $\pm 2\text{ mV}$, alcanzando $\pm 0,1\%$ en los transmisores inteligentes de Redox.

6.5.1.4 Concentración de gases.

(31) “En la industria interesa determinar la concentración de los gases tales como CO_2 , $\text{CO} + \text{H}_2$, O_2 u otros, bien en el análisis de humos de salida de las calderas de vapor para comprobar su combustión correcta, bien en el análisis de concentración de gases desde el punto de vista de seguridad ante una eventual explosión, etc.

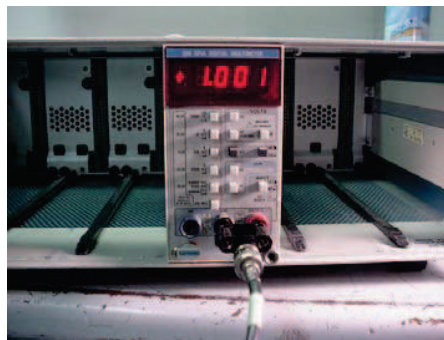


Los analizadores se basan en general en propiedades características de los gases, tales como la conductibilidad térmica, el paramagnetismo del oxígeno y el coeficiente de absorción infrarroja”.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.5.1.5. Conductividad térmica.

Un caso clásico de aplicación del principio de conductividad térmica es la determinación del contenido en dióxido de carbono de los gases de combustión de una caldera de vapor. Esta determinación se basa en la diferente conductividad térmica de dicho gas cuando se compara en una célula con el aire u otros posibles constituyentes del gas de combustión. El gas se aspira con una bomba o con succión por entrada de agua a través de un filtro y pasa a la célula. Ésta contiene un hilo de resistencia calentado eléctricamente y mantenido a una temperatura ligeramente superior a la de las paredes.

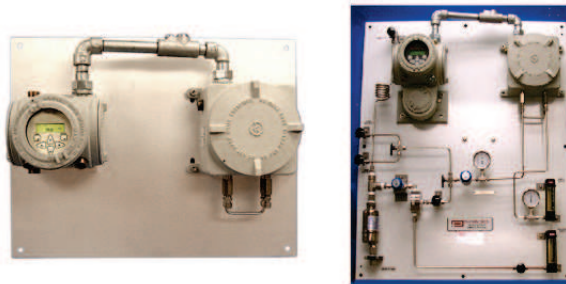


Con un buen diseño y limitando la elevación de temperaturas del hilo caliente se consigue que la transmisión de calor por convección y radiación sea despreciable y que la temperatura, por consiguiente la resistencia del hilo central sea inversamente proporcional a la conductividad del gas que lo rodea. El sistema se utiliza básicamente para la mezcla aire CO_2 pero también puede emplearse en otros gases. Otro ejemplo de utilización de estos analizadores lo constituye la determinación del monóxido de carbono e hidrógeno en los gases de combustión de la caldera de vapor.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.5.1.6. Paramagnetismo del oxígeno.

El paramagnetismo es una propiedad que poseen varios materiales, entre ellos el oxígeno; se magnetizan cuando se exponen a la acción de un campo magnético. De este modo una bola suspendida en equilibrio en un campo magnético variará de posición al pasar el gas a analizar ya que el oxígeno del gas absorberá parte de la energía magnética disponible en el campo. Este principio se emplea en el analizador de la figura en el que el gas circula por dos cámaras idénticas con dos pequeños calefactores.



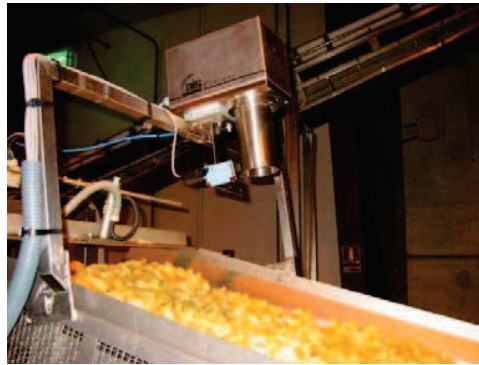
Uno de ellos está en el seno de un fuerte campo magnético con lo que el oxígeno que es para magnético desplaza los otros gases y el elemento calefactor se enfría más rápidamente. De este modo, las diferencias de temperatura medidas con un circuito de puente de Wheatstone son proporcionales a la susceptibilidad magnética del gas y al ser el oxígeno el único gas paramagnético presente, son también proporcionales al contenido de oxígeno.

6.5.1.7 Analizador de infrarrojos.

La radiación infrarroja es sólo una pequeña porción del espectro electromagnético, y es absorbida en cantidades distintas por varios gases. Algunos gases tales como el oxígeno,

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

el nitrógeno, el hidrógeno, el cloro y otros elementales no absorben prácticamente radiaciones infrarrojas.



Otros, sin embargo, como el CO_2 , CO , CH_4 , C_3H_8 , SO_2 , NH_3 o vapor de agua lo absorben en cantidades detectables de acuerdo con la forma de la figura.

Ambas radiaciones inciden alternativamente en las dos cámaras del detector y varían alternativamente la presión, captándola mediante un condensador microfónico una de cuyas placas es la membrana metálica que divide las dos cámaras. La señal es amplificada, rectificadora y registrada. Este analizador se denomina selectivo o de filtraje positivo ya que absorbe energía sólo en la zona para la que está preparado. Otro tipo, denominado de filtraje negativo, filtra todas las radiaciones en la zona seleccionada antes de que alcancen el detector. Éste consiste en dos termopilas conectadas diferencialmente y la unidad no necesita la interrupción alternativa de la radiación infrarroja.

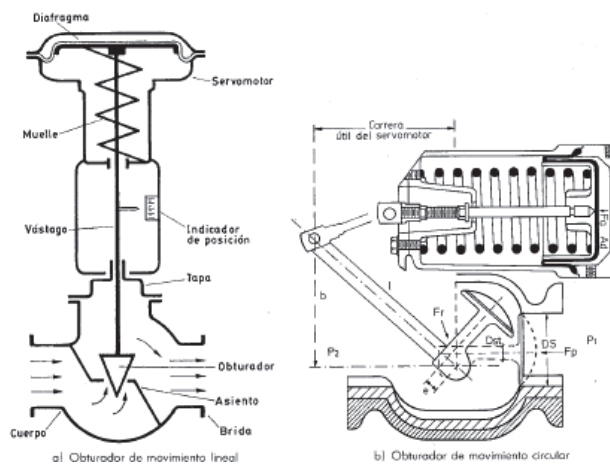
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.6. ELEMENTOS FINALES DE CONTROL.

6.6.1 Válvulas de control.

6.6.1.1 Introducción.

(32) “En el control automático de los procesos industriales la válvula de control juega un papel muy importante en el bucle de regulación. Realiza la función de variar el caudal del fluido de control que modifica a su vez el valor de la variable medida comportándose como un orificio de área continuamente variable. Dentro del bucle de control tiene tanta importancia como el elemento primario, el transmisor y el controlador. En la figura 6.1 puede verse una válvula de control típica.



Se compone básicamente del cuerpo y del servomotor. El cuerpo de la válvula contiene en su interior el obturador y los asientos y está provisto de rosca o de bridas para conectar la válvula a la tubería”. El obturador es quien realiza la función de control de paso del fluido y puede actuar en la dirección de su propio eje o bien tener un

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

movimiento rotativo. Está unido a un vástago que pasa a través de la tapa del cuerpo y que es accionado por el servomotor.

6.6.1.2 Tipos de válvulas.

Las válvulas pueden ser de varios tipos según sea el diseño del cuerpo y el movimiento del obturador. Las válvulas de movimiento lineal en las que el obturador se mueve en la dirección de su propio eje se clasifican como se especifica a continuación.

6.6.1.2.1 Válvula de globo.

Puede verse en las figuras 6.2 a, b y c siendo de simple asiento, de doble asiento y de obturador equilibrado respectivamente. Las válvulas de simple asiento precisan de un actuador de mayor tamaño para que el obturador cierre en contra de la presión diferencial del proceso. Por lo tanto, se emplean cuando la presión del fluido es baja y se precisa que las fugas en posición de cierre sean mínimas.



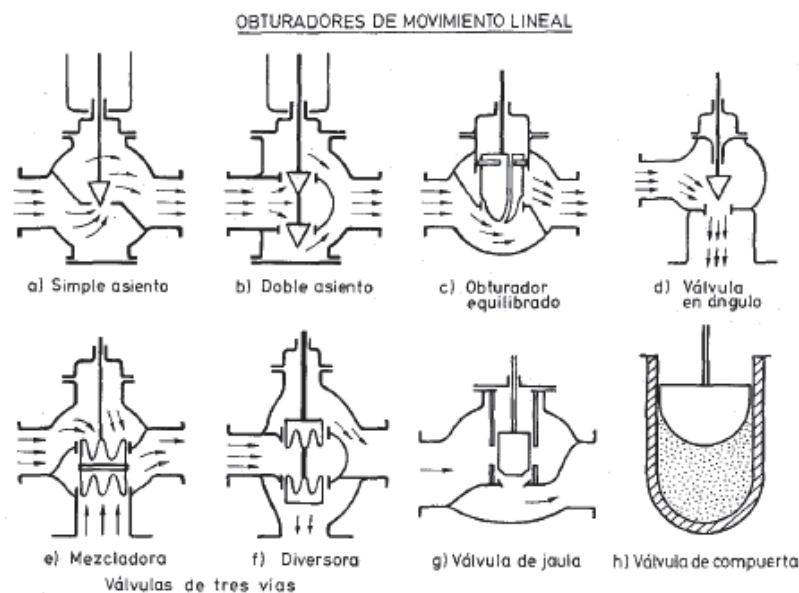
El cierre estanco se logra con obturadores provistos de una arandela de teflón. En la válvula de doble asiento o de obturador equilibrado la fuerza de desequilibrio desarrollada por la presión diferencial a través del obturador es menor que en la válvula de simple asiento. Por este motivo se emplea en válvulas de gran tamaño o bien cuando

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

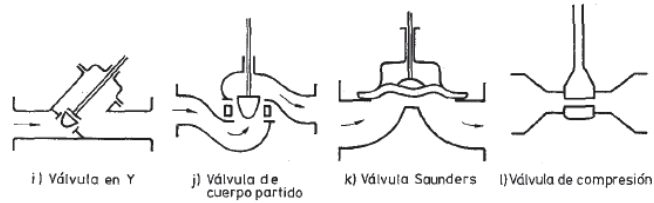
deba trabajarse con una alta presión diferencial. En posición de cierre las fugas son mayores que en una válvula de simple asiento. Como dato orientativo puede señalarse que según la norma ANSI B 16.104-1976, las fugas admisibles son de 0.1 % del caudal máximo en la válvula de simple asiento y de 0.5 % en la válvula de doble asiento. Asimismo, las válvulas con obturador dotado de anillo de teflón para cierre hermético admiten un caudal de fuga de 1 a 40 burbujas de aire o NZ por minuto.

6.6.1.2 Válvula en ángulo.

Esta válvula representada en la figura 6.2 d, 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 el control de fluidos que vaporizan (flashing), para trabajar con grandes presiones diferenciales y para los fluidos que contienen sólidos en suspensión.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO



6.6.1.2.3 Válvula de tres vías.

Este tipo de válvula se emplea generalmente para mezclar fluidos – válvulas mezcladoras (fig. 6.2 e) o bien para derivar de un flujo de entrada dos de salida válvulas divisoras (fig. 6.2 f). Las válvulas de tres vías intervienen típicamente en el control de temperatura de intercambiadores de calor.



6.6.1.2.4 Válvula de jaula.

Consiste en un obturador cilíndrico que desliza en una jaula con orificios adecuados a las características de caudal deseadas en la válvula (fig. 6.2 g). Se caracterizan por el fácil desmontaje del obturador y porque éste puede incorporar orificios que permiten eliminar prácticamente el desequilibrio de fuerzas producido por la presión diferencial favoreciendo la estabilidad del funcionamiento. Por este motivo, este tipo de obturador equilibrado se emplea en válvulas de gran tamaño o bien cuando deba trabajarse con una

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

alta presión diferencial. Como el obturador está contenido dentro de la jaula, la válvula es muy resistente a las vibraciones y al desgaste. Por otro lado, el obturador puede disponer de aros de teflón que, con la válvula en posición cerrada, asientan contra la jaula y permiten lograr así un cierre hermético.



6.6.1.2.5 Válvula de compuerta.

Esta válvula efectúa su cierre con un disco vertical plano, o de forma especial, y que se mueve verticalmente al flujo del fluido. Por su disposición es adecuada generalmente para control todo-nada, ya que en posiciones intermedias tiende a bloquearse. Tiene la ventaja de presentar muy poca resistencia al flujo de fluido cuando está en posición de apertura total (fig. 6.2 h).



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.6.1.2.6 Válvula en Y.

En la figura 6.2i puede verse su forma. Es adecuada como válvula de cierre y de control. Como válvula todo-nada se caracteriza por su baja pérdida de carga y como válvula de control presenta una gran capacidad de caudal. Posee una característica de autodrenaje cuando está instalada inclinada con un cierto ángulo. Se emplea usualmente en instalaciones criogénicas.



6.6.1.2.7 Válvula de cuerpo partido.

Esta válvula (fig. 6.2 j) es una modificación de la válvula de globo de simple asiento teniendo el cuerpo partido en dos partes entre las cuales está presionado el asiento. Esta disposición permite una fácil sustitución del asiento y facilita un flujo suave del fluido sin espacios muertos en el cuerpo. Se emplea principalmente para fluidos viscosos y en la industria alimentaria.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.6.1.2.8 Válvula Saunders.

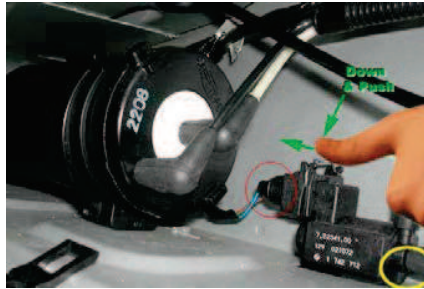
En la válvula Saunders (fig. 6.2 k), el obturador es una membrana flexible que a través de un vástago unido a un servomotor, es forzada contra un resalte del cuerpo cerrando así el paso del fluido. La válvula se caracteriza porque el cuerpo puede revestirse fácilmente de goma o de plástico para trabajar con fluidos agresivos. Tiene la desventaja de que el servomotor de accionamiento debe ser muy potente. Se utiliza principalmente en procesos químicos difíciles, en particular en el manejo de fluidos negros o agresivos o bien en el control de fluidos conteniendo sólidos en suspensión.



6.6.1.2.9 Válvula de compresión.

Esta válvula funciona mediante el pinzamiento de dos o más elementos flexibles, por ejemplo, un tubo de goma. Igual que las válvulas de diafragma se caracterizan porque proporcionan un óptimo control en posición de cierre parcial y se aplican fundamentalmente en el manejo de fluidos negros corrosivos, viscosos o conteniendo partículas sólidas en suspensión (ver figura 6.2 j).

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO



6.6.1.2.10 Válvula de obturador excéntrico rotativo.

Consiste en un obturador de superficie esférica que tiene un movimiento rotativo excéntrico y que está unido al eje de giro por uno o dos brazos flexibles (fig. 6.2 m). El eje de giro sale al exterior del cuerpo y es accionado por el vástago de un servomotor. El par de éste es reducido gracias al movimiento excéntrico de la cara esférica del obturador. La válvula puede tener un cierre estanco mediante aros de teflón dispuestos en el asiento y se caracteriza por su gran capacidad de caudal, comparable a las válvulas mariposa y a las de bola y por su elevada pérdida de carga admisible.



6.6.1.2.11 Válvula de obturador cilíndrico excéntrico.

Esta válvula (fig. 6.2 n) tiene un obturador cilíndrico excéntrico que asienta contra un cuerpo cilíndrico. El cierre hermético se consigue con un revestimiento de goma o teflón en la cara del cuerpo donde asienta el obturador. La válvula es de bajo coste y tiene una

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

capacidad relativamente alta. Es adecuada para fluidos corrosivos y líquidos viscosos o conteniendo sólidos en suspensión.

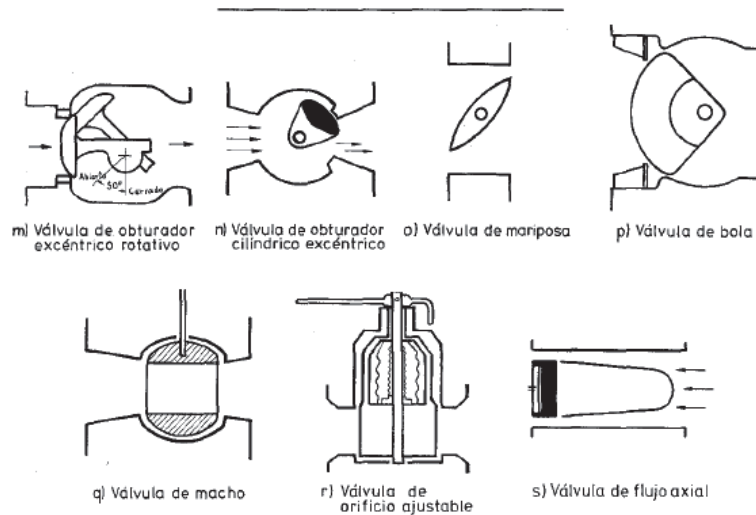


Fig. 8.2 Tipos de válvulas de control.

6.6.1.2.12 Válvula de mariposa.

El cuerpo está formado por un anillo cilíndrico dentro del cual gira transversalmente un disco circular (fig. 6.2 o). La válvula puede cerrar herméticamente mediante un anillo de goma encastrado en el cuerpo. Un servomotor exterior acciona el eje de giro del disco y ejerce su par máximo cuando la válvula está totalmente abierta (en control todo-nada se consideran 90° y en control continuo 60° , a partir de la posición de cierre ya que la última parte del giro es bastante inestable), siempre que la presión diferencial 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 fuerza grande del actuador para accionar la válvula en caso de una

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

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



6.6.1.2.13 Válvula de bola.

El cuerpo de la válvula tiene una cavidad interna esférica que alberga un obturador en forma de esfera o de bola (de ahí su nombre) (fig. 6.2 p). La bola tiene un corte adecuado (usualmente en V) que fija la curva característica de la válvula, y gira transversalmente accionada por un servomotor exterior. El cierre estanco se logra con un aro de teflón incorporado al cuerpo contra el cual asienta la bola cuando la válvula está 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 el control de caudal de fluidos negros, o bien en fluidos con gran porcentaje de sólidos en suspensión.



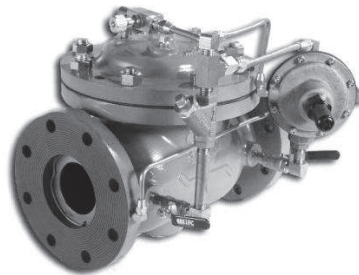
Una válvula de bola típica es la válvula macho (fig. 6.2 q) que consiste en un macho de forma cilíndrica o troncocónica con un orificio transversal igual al diámetro interior de la tubería. El macho ajusta en el cuerpo de la válvula y tiene un movimiento de giro de 90°.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Se utiliza generalmente en el control manual todo - nada de líquidos o gases y en regulación de caudal.

6.6.1.2.14 Válvula de orificio ajustable.

El obturador de esta válvula consiste en una camisa de forma cilíndrica que está perforada con dos orificios, uno de entrada y otro de salida, que gira mediante una palanca exterior accionada manualmente o por medio de un servomotor. El giro del obturador tapa parcial o totalmente las entradas y salidas de la válvula controlando así el caudal. La válvula incorpora además una tajadera cilíndrica que puede deslizarse dentro de la camisa gracias a un macho roscado de accionamiento exterior.



La tajadera puede así fijarse manualmente en una posición determinada para limitar el caudal máximo (fig. 6.2 r). La válvula es adecuada en los casos en que es necesario ajustar manualmente el caudal máximo del fluido, cuando el caudal puede variar entre límites amplios de forma intermitente o continua y cuando no se requiere un cierre estanco. Se utiliza para combustibles gaseosos o líquidos, vapor, aire comprimido y líquidos en general.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.6.1.2.15 Válvula de flujo axial

(33) “Las válvulas de flujo axial consisten en un diafragma accionado neumáticamente que mueve un pistón, el cual a su vez comprime un fluido hidráulica contra un obturador formado por un material elastómero. De este modo, el obturador se expansiona para cerrar el flujo anular del fluido. Este tipo de válvulas se emplea para gases y es especialmente silencioso. Otra variedad de la válvula de flujo axial es la válvula de manguito, que es accionada por compresión exterior del manguito a través de un fluido auxiliar a una presión superior a la del propio fluido. Se utiliza también para gases (ver figura 6.2 s)”.

6.6.1.3 Cuerpo de la válvula.

El cuerpo de la válvula debe resistir la temperatura y la presión del fluido sin pérdidas, tener un tamaño adecuado para el caudal que debe controlar y ser resistente a la erosión o a la corrosión producidas por el fluido. El cuerpo y las conexiones a la tubería (bridadas o roscadas) están normalizados de acuerdo con las presiones y temperaturas de trabajo en las normas DIN y ANSI, entre otras, según puede verse en las figuras 6.3.

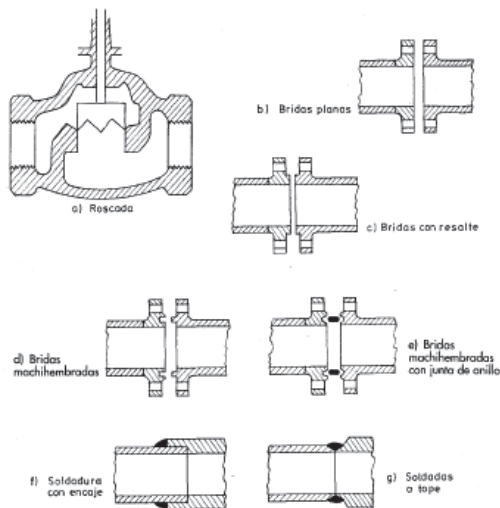
Cabe señalar los puntos siguientes:

- a. Las conexiones roscadas se utilizan hasta 2".
- b. Las bridas pueden ser planas, con resalte, machihembradas con junta de anillo.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

- c. Las conexiones soldadas pueden ser con encaje o con soldadura a tope. Las primeras se emplean para tamaños de válvulas hasta 2" y las segundas desde 2 ½" a tamaños mayores.

El cuerpo suele ser de hierro, acero y acero inoxidable y en casos especiales los materiales pueden ser de monel, hastelloy B o C, etc. Empiezan a utilizarse nuevos materiales termoplásticos para el cuerpo de las válvulas.



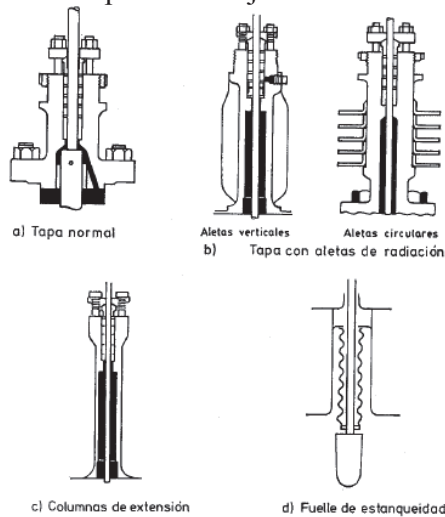
En aplicaciones químicas hasta 140°C y 10 bar, las válvulas termoplásticas son de elección en particular por su resistencia a la corrosión, abrasión y congelación, por su alta pureza y por su bajo coste. No son adecuadas en casos de fuerte vibración o en ambientes con posible abuso mecánico.

6.8.1.4 Tapa de la válvula.

La tapa de la válvula de control tiene por objeto unir el cuerpo al servomotor. A través desliza el vástago del obturador accionado por el motor. Este vástago dispone

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

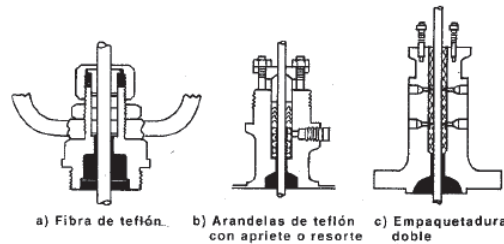
generalmente de un índice que señala en una escala la posición de apertura o de cierre de la válvula. Para que el fluido no se escape a través de la tapa es necesario disponer una caja de empaquetadura entre la tapa y el vástago. A temperaturas superiores o inferiores a este valor es necesario o bien emplear otro material o bien alejar la empaquetadura del cuerpo de la válvula para que se establezca así un gradiente de temperaturas entre el fluido y la estopada y esta última pueda trabajar satisfactoriamente.



La empaquetadura normal no proporciona un sello perfecto para el fluido. En el caso de fluidos corrosivos, tóxicos, radiactivos, o muy valiosos hay que asegurar un cierre total en la estopada. Los fuelles de estanqueidad lo proporcionan al estar unidos por un lado al vástago y por el otro a la tapa. La estanqueidad lograda es tan perfecta que las posibles fugas sólo pueden detectarse mediante ensayos realizados con un espectrómetro de masas.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

La caja de empaquetadura de la válvula consiste en unos anillos de estopada comprimidos por medio de una tuerca (fig. 6.5 a) o bien mediante una brida de presión regulable con dos tuercas (fig. 6.5 b).



Existen diversos tipos de empaquetaduras según sean las presiones y temperaturas de trabajo y el tipo de fluido. Las empaquetaduras con engrase están dejando de utilizarse por precisar de una válvula de engrase que periódicamente debe apretarse.

La Norma de Aire Limpio (Clean Air Act) de 1990 limita las fugas de fluidos químicos orgánicos volátiles desde las válvulas a la atmósfera. Su observancia ha conducido a los fabricantes de válvulas de control a rediseñar las empaquetaduras del vástago, que son la causa principal de las emisiones que se producen.

6.6.1.5 Partes internas de la válvula. Obturador y asientos.

6.6.1.5.1 Generalidades.

Como partes internas de la válvula se consideran generalmente las piezas metálicas internas desmontables que están en contacto directo con el fluido. Estas piezas son el vástago, la empaquetadura, el collarín de lubricación en la empaquetadura (si se emplea), los anillos de guía del vástago, el obturador y el asiento o los asientos. Hay que señalar que el obturador y el asiento constituyen el **corazón de la válvula** al controlar el caudal

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

gracias al orificio de paso variable que forman al variar su posición relativa, y que además tienen la misión de cerrar el paso del fluido.

El Obturador y los asientos en su selección intervienen tres puntos principales:

1. Materiales normales y los especiales aptos para contrarrestar la corrosión, la erosión y el desgaste producidos por el fluido.
2. Características de caudal en función de la carrera.
3. Tamaño normal o reducido que permite obtener varias capacidades de caudal de la válvula con el mismo tamaño del cuerpo.

6.6.1.5.2 Materiales

(34) “El obturador y los asientos se fabrican normalmente en acero inoxidable porque este material es muy resistente a la corrosión y a la erosión del fluido. Cuando la velocidad del fluido es baja, pueden utilizarse PVC, fluorocarbonos y otros materiales blandos, solos o reforzados con fibras de vidrio o grafito. En algunas válvulas pueden utilizarse obturadores y asientos de cerámica. Los materiales especiales resistentes a la corrosión y a la erosión tanto en el obturador y asientos como en el cuerpo se estudian más adelante”.

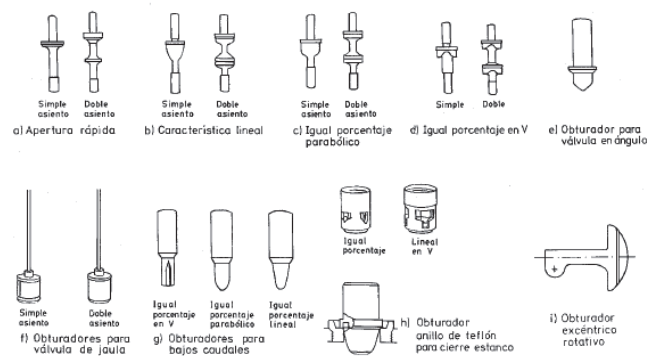
6.6.1.5.3 Características de caudal inherente.

El obturador determina la característica de caudal de la válvula; es decir, la relación que existe entre la posición del obturador y el caudal de paso del fluido. La característica de un fluido incompresible fluyendo en condiciones de presión diferencial constante a través de la válvula se denomina característica de caudal inherente y se representa usualmente

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

considerando como abscisas la carrera del obturador de la válvula y como ordenadas el porcentaje de caudal máximo bajo una presión diferencial constante.

En la figura 6.6 pueden verse varios tipos de obturadores cuya forma y mecanización determina esta característica.



El obturador con característica de apertura rápida (fig. 6.6 a) tiene la forma de un disco plano. En el obturador con característica lineal (figs. 6.6 b, f, g, i), el caudal es directamente proporcional a la carrera según la ecuación:

$$q = Kl$$

En la que:

q = Caudal a pérdida de carga constante.

K = Constante.

l = Carrera de la válvula.

La rangeability o campo de control de caudales que la válvula es capaz de regular manteniendo la curva característica inherente es en la válvula lineal de 15 a 1 o de 30 a 1.

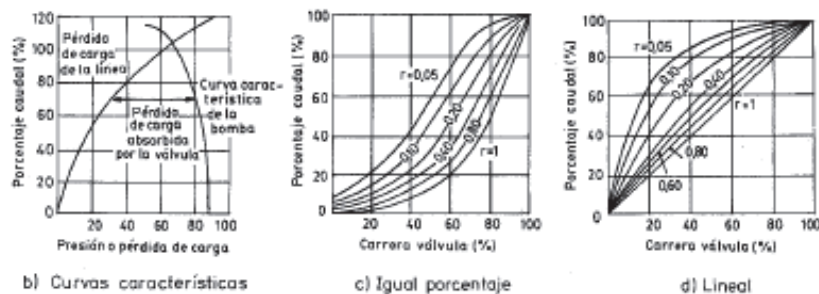
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Si bien teóricamente podría ser infinita, las dificultades de fabricación la limitan a este valor.

6.6.1.5.4 Características de caudal efectivas.

Hay que señalar que en la mayor parte de las válvulas que trabajan en condiciones reales, la presión diferencial cambia cuando varía la apertura de la válvula, por lo cual la curva real que relaciona la carrera de la válvula con el caudal, se aparta de la característica de caudal inherente. Esta nueva curva recibe el nombre de característica de caudal efectiva.

Como la variación de presión diferencial señalada depende de las combinaciones entre la resistencia de la tubería, y las características de las bombas y tanques del proceso, es evidente que una misma válvula instalada en procesos diferentes presentará inevitablemente curvas características efectivas distintas. Es evidente que las características de impulsión de la bomba y la pérdida de carga absorbida por el sistema variarán según sea el grado de apertura de la válvula. En la figura 6.7 puede verse que las diferencias entre la presión de impulsión de la bomba y la pérdida de carga de la tubería al variar el caudal corresponden a la pérdida de carga absorbida por la válvula y que ésta aumenta al disminuir el caudal.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Expresando la pérdida de la presión de la válvula a su capacidad nominal (apertura completa), con relación a la pérdida de carga del sistema (línea + válvula) se obtiene un coeficiente r . El valor de este coeficiente dependerá del tamaño relativo de la válvula con relación al de la tubería (menor ϕ de válvula mayor valor de r) y de la resistencia de la tubería con relación al conjunto (menor resistencia mayor r).

6.6.1.5.5 Selección de la característica de la válvula.

(35) “Las curvas efectivas de las válvulas de control plantean un problema, el de la selección de la curva adecuada que satisfaga las características del proceso. Desde un punto de vista ideal, la característica efectiva de la válvula debe ser tal que el bucle de control tenga la misma estabilidad para todas las variaciones de carga del proceso. Un bucle de control es estable si la ganancia del bucle es menor que 1.

En el proceso (fig. 6.8 a) la ganancia total del bucle de control equivale al producto de las ganancias del proceso, del transmisor, del controlador y de la válvula de control. Es decir, a:

$$G = \frac{\Delta v}{\Delta q} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta v} \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta q}{\Delta s}$$

Expresión en la que:

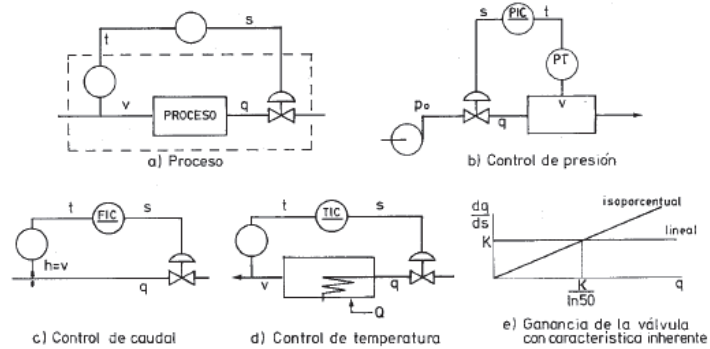
Δq = Variación de caudal del fluido de control.

Δv = Incremento de la variable del proceso.

Δt = Incremento de la señal de salida del transmisor.

Δs = Incremento de la señal de salida del controlador a la válvula de control.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO



Para facilitar el estudio dinámico, el transmisor y la válvula de control se consideran incluidos dentro del proceso con lo cual la expresión anterior pasa a:

$$G = \frac{\Delta s}{\Delta t} \times \frac{\Delta t}{\Delta s}$$

Se verifica la ecuación:

$$Q. 1. v = q. c. t_f$$

En la que:

Q = Caudal de agua.

v = Temperatura de salida.

q = Caudal de fluido térmico.

c = Calor específico del fluido térmico.

t_f = Temperatura del fluido térmico.

Habiendo considerado que el rendimiento de la instalación es la unidad y que la temperatura de referencia es 0°C”.

Luego, derivando la expresión anterior con relación a, q resulta:

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

$$Q \frac{dv}{dq} = c \cdot t_f$$

luego:

$$\frac{dv}{dq} = \frac{c \cdot t_f}{Q}$$

es decir, que la ganancia del proceso es inversamente proporcional a los cambios de carga del producto.

En los procesos de caudal y de control de temperatura analizados en que la ganancia era directamente proporcional al caudal de la válvula e inversamente proporcional al caudal del producto respectivamente es preferible la característica isoporcentual. En efecto, en la característica isoporcentual inherente de la válvula con rangeability 50, la ganancia es q In 50 directamente proporcional al caudal, lo que compensa bastante las variaciones de ganancia del proceso. Al ir disminuyendo el valor de r la válvula tiende a una característica lineal con ganancia casi constante y la compensación existirá para caudales bajos hasta la mitad de la carrera aproximadamente; esto indica que un bucle de control ajustado a valores bajos de demanda de caudal del fluido de control, es decir, con la válvula sobredimensionada se volverá perezoso para valores altos ya que en esta zona la ganancia de la válvula será pequeña, suele presentar picos por encima del valor unidad, de tal modo que es posible que en procesos determinados se presenten inestabilidades en algunos puntos de la carrera de la válvula.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.1.6 Corrosión y erosión en las válvulas. Materiales.

No existe actualmente ningún material que resista la corrosión de todos los fluidos, por lo cual en muchos casos es necesario utilizar materiales combinados cuya selección dependerá del medio específico donde deban trabajar.

Cuando el material resistente a la corrosión es caro o no adecuado, pueden utilizarse materiales de revestimiento, tales como plásticos, fluorocarbonos, elastómeros, vidrio, plomo y tantalio. Como es lógico, el revestimiento no debe fallar pues el fluido atacaría el metal base y la válvula se perforaría. La erosión se produce cuando partículas a alta velocidad en el seno del fluido chocan contra la superficie del material de la válvula. Estas condiciones se encuentran en la vaporización de un líquido (flashing), con arena, fangos, etc.

Cloruro de Polivinilo (PVC)	0.10 gramos/día	0.07 cm ³ /día
Polipropileno (PP)	0.13 gramos/día	0.14 cm ³ /día
Hierro fundido	7.85 gramos/día	1.12 cm ³ /día

Figuran a continuación, en orden decreciente de resistencia a la erosión, los tipos de válvulas más adecuados.

1. Válvula en ángulo de simple asiento, con obturador contorneado fluido tendiendo a cerrar.
2. Válvula de jaula de cierre estanco.
3. Válvula de globo de simple asiento con obturador contorneado.
4. Válvula de globo de simple asiento con obturador en V.

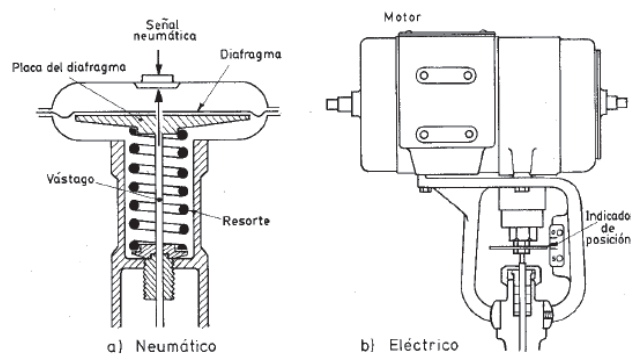
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

5. Válvula de jaula equilibrada.
6. Válvula de globo de doble asiento con obturador contorneado.
7. Válvula de globo de doble asiento con obturador en V contorneado.

El obturador y el asiento son los más castigados por la erosión. Existen materiales especiales que recubren el obturador y el asiento o que los forman totalmente según sea el grado de protección deseado.

6.6.1.7 Servomotores.

Los servomotores pueden ser neumáticos, eléctricos, hidráulicos y digitales, si bien se emplean generalmente los dos primeros por ser más simples, de actuación rápida y tener una gran capacidad de esfuerzo. Puede afirmarse que el 90% de las válvulas utilizadas en la industria son accionadas neumáticamente.



Los servomotores hidráulicos consisten en una bomba de accionamiento eléctrico que suministra fluido hidráulico a una servoválvula. La señal del instrumento de control actúa sobre la servoválvula que dirige el fluido hidráulico a los dos lados del pistón actuador hasta conseguir, mediante una retroalimentación, la posición exacta de la válvula. Se

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

caracterizan por ser extremadamente rápidos, potentes y suaves, si bien su coste es elevado, por lo que sólo se emplean cuando los servomotores neumáticos no pueden cumplir con las especificaciones de servicio. Las válvulas digitales disponen de compuertas neumáticas accionadas por electroválvulas que, a su vez, son excitadas por la señal de salida binaria de un microprocesador. Su respuesta es muy rápida (una compuerta 500 ms) y el grado de abertura depende de la combinación de las compuertas (8 compuertas darán 1,2,4, ... , 128 relaciones de capacidad

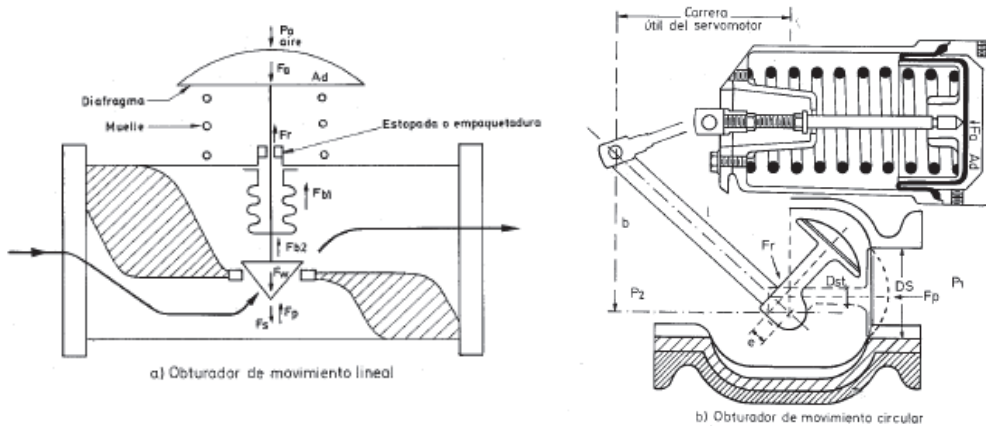
6.6.1.7.1 Servomotor neumático.

(36) “El servomotor neumático (fig. 6.8 a) consiste en un diafragma con resorte que trabaja (con algunas excepciones) entre 3 y 15 psi (0.2 - 1 bar), es decir, que las posiciones extremas de la válvula corresponden a 3 y 15 psi (0.2 y 1 bar) fuerza ejercida por la presión del aire sobre el diafragma y la fuerza ejercida por el resorte. En la práctica las válvulas de control se desvían de este comportamiento debido a las causas siguientes:

1. Rozamientos en la estopada.
2. Histéresis y falta de linealidad del resorte que son poco importantes desde el punto de vista de este estudio práctico.
3. Área efectiva del obturador que varía con la carrera del vástago de la válvula.
4. Esfuerzo en el obturador de la válvula creado por la presión diferencial del fluido.
5. Fuerza adicional del servomotor necesaria para conseguir un cierre efectivo entre el obturador y el asiento (fuerza de asentamiento).

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

En la válvula existe un equilibrio entre estas diversas fuerzas que viene dado por la siguiente fórmula (fig. 6.9):



$$F_a \cong F_r + F_s + F_w + F_{b1} \pm F_{b2} + F_p$$

En la que:

F_a = Fuerza resultante obtenida por el servomotor, en kg.

F_r = Fuerza de rozamiento, en kg.

F_s = Fuerza de asentamiento, en kg.

F_w = Peso del obturador, en kg.

F_{b1} = Fuerza elástica del fuelle de estanqueidad, en kg.

F_{b2} = Fuerza de desequilibrio del fuelle de estanqueidad, en kg.

F_p = Fuerza estática y dinámica sobre el obturador, en kg.

La fuerza resultante F_a obtenida por el actuador depende de la acción de la válvula (aire cierra, aire abre). En una válvula de acción directa (aire cierre) vale:

$$F_a = A_d \cdot P_a \times 1.02 - F_{sr} = A_d(P_a - F_2) \times 1.02$$

Con $F_{sr} = A_d F_2 \times 1.02$

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

En la que:

A_d = Área efectiva del diafragma, en cm^2

P_a = Presión de aire sobre el diafragma, en bar.

F_{sr} = Fuerza debida a la compresión final del muelle a carrera total, en kg.

F_2 = Compresión final del muelle a carrera total, en bar.

En una válvula de acción inversa (aire abre) es”:

$$F_a = A_d F_1 \times 1.02$$

en la que F_1 , es compresión inicial del muelle a carrera cero, en bar.

Hay que señalar que los muelles que se oponen al diafragma poseen las características siguientes:

Margen de compresión: Por ejemplo, 3 a 15 psi (0,2-1 bar).

Carrera.

Gradiente: Fuerza requerida para comprimir el muelle 1 cm.

Flexión total. Centímetros de longitud con que el muelle puede comprimirse hasta que las espiras se toquen y sea imposible una compresión ulterior.

Una regla práctica da los valores siguientes:

Tipo de empaquetadura	Tamaño de la Válvula	Rozamiento
Apriete con resorte	$\frac{1}{2}$ a $1 \frac{1}{4}$ "	5 kg.
	$1 \frac{1}{2}$ a $2 \frac{1}{2}$ "	10kg.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

	3 a 12"	15kg.
Ajuste manual	½ a 1 ¼ "	10 kg.
	1 ½ a 2 ½ "	20 kg.
	3 a 12 "	30 kg.

Las válvulas con obturador de movimiento circular y con servomotor de acoplamiento directo con oscilación libre del vástago, sólo tienen un rozamiento en la estopada en la superficie en contacto con el árbol de giro del obturador.

La **fuerza de asentamiento** permite cerrar la válvula y conseguir que la fuga de fluido sea mínima: su valor depende del grado de mecanización del asiento y del obturador.

La fuerza de asentamiento en kg equivale aproximadamente a 0.25 – 0.75 veces la circunferencia en cm del aro del asiento. Puede aplicarse la fórmula general con un valor medio de 0.5:

$$F_s = 0.5 \pi D_s$$

En la que:

F_s = Fuerza de asentamiento, en kg.

D_s = ϕ interior del asiento, en cm.

En las válvulas con obturador de movimiento circular, la fuerza de asentamiento se ve facilitada por la relación de brazos de palanca del acoplamiento entre el vástago del servomotor y el árbol del obturador. Esta relación es de 3 o más, con lo cual el servomotor puede ser más pequeño que en las válvulas con obturador de movimiento

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

lineal. Por otro lado, el rozamiento en posición de cierre de las válvulas de obturador excéntrico y de mariposa sólo se presenta para ángulos de apertura muy pequeños, mientras que en las válvulas de globo y de bola el elemento de cierre está en contacto con el asiento, con lo que el rozamiento es más importante.

El peso del obturador F_w sólo se considera cuando la válvula está en posición vertical.

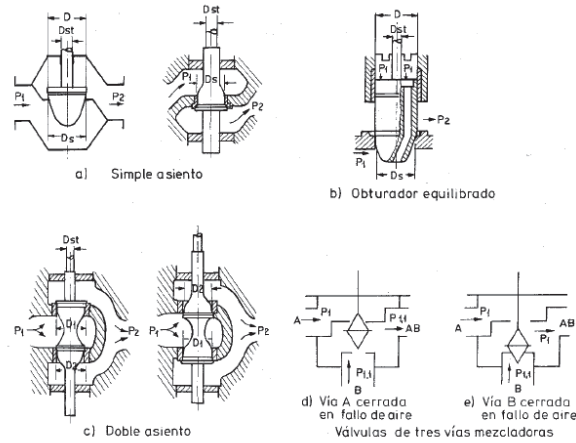
La fuerza elástica F_{b1} del fuelle de estanqueidad obliga a una fuerza adicional en el servomotor para comprimir o tensionar los fuelles.

La fuerza de desequilibrio F_{b2} del fuelle de estanqueidad es igual al producto del área efectiva del fuelle por la presión del fluido existente en la válvula de control.

Las fuerzas estáticas y dinámicas F_p en las válvulas de control son debidas en su mayor parte a la presión del fluido sobre el obturador. En la práctica, las fuerzas dinámicas no se conocen perfectamente debido a la falta de datos de ensayo suficientes. Entre las mismas figuran el empuje lateral del fluido, y el fenómeno de succión del obturador cuando éste se aproxima al asiento debido al aumento de velocidad que se produce. La influencia de las fuerzas dinámicas es casi despreciable frente a las demás fuerzas estáticas en particular con el obturador en la posición de cierre. Estas fuerzas varían según el tipo de válvula: En una válvula de simple asiento en la posición de cierre, la presión de salida P_2 es generalmente igual a cero.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Examinando la figura 6.9 a puede verse:



Ejemplo de Válvulas de control.

(37) “Ejemplo 1”.

Determinar la fuerza máxima del servomotor en una válvula de control de las siguientes características:

$$A_d = 940 \text{ cm}^2$$

$$\text{Campo de trabajo del muelle} = 0.4 - 2 \text{ bar.}$$

$$\text{Carrera del servomotor} = 51 \text{ mm.}$$

Válvula de tamaño 2" (50 mm) con obturador en V o interior del asiento = 5.08 cm.

$$\text{Área del asiento} = 20.27 \text{ cm}^2$$

$$\text{Carrera del obturador} = 23.8 \text{ mm.}$$

$$\text{Área transversal del vástago} = 0.97 \text{ cm}^2$$

$$\text{Peso del obturador} = 8 \text{ kg}$$

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Acción inversa = aire abre

Margen de trabajo del muelle para un recorrido del obturador de 23.8 mm

$$\frac{2 - 0.4}{51} = 23.8 = 0.74 \text{ bar}$$

La compresión inicial del muelle es:

$$2 - 0.74 = 1.26 \text{ bar}$$

Y el margen de compresión será entre 1.26 - 2 bar.

Luego la fuerza del actuador con la válvula en posición de cierre es:

$$F_a = A_d F_1 = 940 \times 1.26 \times 1.02 = 1208 \text{ kg}$$

La fuerza de rozamiento es aproximadamente:

$$F_r = 10 \text{ kg} \text{ (válvulas de } 1 \frac{1}{2} \text{ a } 2 \frac{1}{2} \text{ ")}$$

La fuerza de asentamiento: $F_a = 0.5 \pi (5.08 \text{ cm}) = 8 \text{ kg}$.

El peso del obturador: $F_w = 8 \text{ kg}$.

La fuerza estática sobre el obturador:

$$F_p = (A_s - A_{st}) P_1 \times 1.02 = (20.27 - 0.97) P_1 \times 1.02$$

Y finalmente $1208 \text{ kg} = F_a \geq 10 + 8 + 8 + (20.27 - 0.97) P_1 \times 1.02$

Resolviendo esta ecuación $P_1 = 58.8 \text{ bar}$ (60 kg/cm^2) es decir, la máxima presión de cierre o la presión de entrada del fluido será de 58.8 bar (60 kg/cm^2).

Ejemplo 2

Con la misma válvula, pero de acción directa (abre en fallo de aire) y con un campo de trabajo de 0.2 a 1 kg/cm^2 y una presión máxima de aire de 1.4 kg/cm^2 , resulta:

Margen de trabajo del muelle para un recorrido del obturador de 23.8 mm

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

$$\frac{(1 - 0.2) \cdot 23.8}{51} = 0.37 \text{ bar}$$

Compresión final del muelle $0.2 + 0.37 = 0.57 \text{ bar}$

Margen de compresión $0.2 - 0.57 \text{ bar}$.

$$F_a = A_d (P_a - F_2) \times 1.02 = 940(1.4 - 0.57) \times 1.02 = 795.8 \text{ kg}$$

$$F_r = 10 \text{ kg} \quad F_s = 8 \text{ kg}. \quad F_w = 8 \text{ kg}.$$

$$F_p = A_s P_1 = (20.27) P_1 \times 1.02$$

$$1208 \text{ kg} = F_a \geq 10 + 8 + 8 + (20.27) P_1 \times 1.02$$

Resolviendo esta ecuación resulta: $P_1 = 37.2 \text{ bar} = 37.9 \text{ kg/ cm}^2$ que es la máxima presión de cierre o la presión de entrada del fluido.

Ejemplo 3.

Válvula de obturador excéntrico rotativo de las siguientes características:

Campo de trabajo del muelle = 0.4 a 1 bar.

Carrera del servomotor = 89 mm.

Área del servomotor = 90 cm^2

Válvula de tamaño 2" (50 mm) con obturador excéntrico rotativo.

Diámetro interior del asiento = 5.2 cm.

Área del asiento = 21.2 cm^2

Área transversal del brazo del obturador = 1 cm^2

Giro del obturador = 60°

Longitud del brazo del obturador = 5.5 cm

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Distancia entre el eje del árbol y el eje del obturador = 1.8 cm

Acción inversa = aire abre (sin aire cierra)

El movimiento lineal del vástago del servomotor equivalente al desplazamiento angular total del obturador es:

$$5.5 \cos 60^\circ = 2.75 \text{ cm.}$$

Margen de trabajo del muelle para un recorrido del vástago del servomotor de 89 mm

$$\frac{1 - 0.4}{89} 27.5 = 0.18 \text{ bar}$$

La compresión inicial del muelle es:

$$1 - 0.18 = 0.82 \text{ bar}$$

Y el margen de compresión será: 0.82 - 1 bar

La fuerza del actuador con la válvula en posición de cierre es:

$$F = A \cdot P = 90 \times 0.82 \times 1.02 = 73.4 \text{ kg}$$

Y la fuerza equivalente a nivel del obturador es:

$$\frac{73.4 - 5.5}{1.8} = 214 \text{ kg}$$

La fuerza estática sobre el obturador es:

$$224 = (A_s - A_{st})P_1 \times 1.02 = (21.2 - 1)P_1 \times 1.02$$

Luego resulta $P_1 = 10.8 \text{ kg/cm}^2$

Cuando la válvula no está cerrada, la presión diferencial que el fluido ejerce sobre la misma varía con el grado de abertura. Esta variación distorsiona la relación lineal teórica entre la fuerza ejercida por el servomotor y la correspondiente carrera del obturador. En

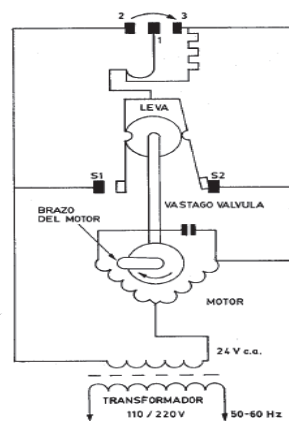
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

la posición de cierre, una presión diferencial de 3,3 kg (50 psi) da lugar a una fuerza dirigida hacia arriba que el fluido ejerce sobre el obturador de 250 kg (630 lb). A medida que la válvula abre, esta fuerza se reduce ya que el obturador se aleja del área de máxima caída de presión.

6.6.1.7.2 Servomotor eléctrico.

El servomotor eléctrico es un motor eléctrico acoplado al vástago de la válvula a través de un tren de engranajes. El motor se caracteriza fundamentalmente por su par y por el tiempo requerido (usualmente 1 minuto) para hacer pasar la válvula de la posición abierta a la cerrada o viceversa. Existen básicamente tres tipos de circuitos eléctricos de control capaces de actuar sobre el motor: Todo-nada, flotante y proporcional.

El circuito todo-nada representado en la figura 6.11 consiste en un motor eléctrico unidireccional acoplado al vástago de la válvula con una leva que fija el principio y el final de la rotación del motor gracias a dos interruptores de final de carrera S_1 y S_2 .



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Según la posición del elemento de control (cierre entre los contactos 1-2 o entre 1-3) se excita el devanado de la derecha o el de la izquierda de la figura y el motor gira en uno u otro sentido hasta el final de su carrera.

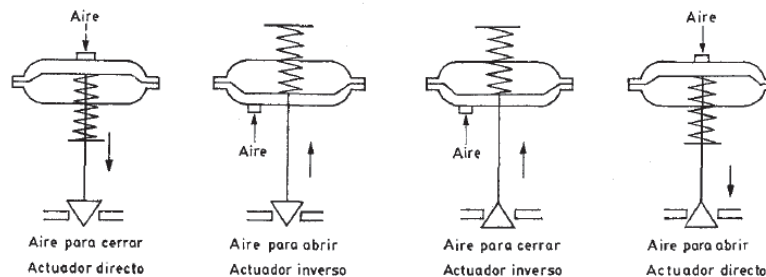
Consiste en una armadura ligera en forma de U que pivota en su centro entre dos bobinados de control; posee una lámina con un contacto móvil que flota entre dos contactos fijos conectados a las bobinas del motor a través de dos interruptores de final de carrera. Si las posiciones de los brazos móviles en los dos potenciómetros, el del controlador y el del motor se corresponden, la corriente que fluye en los dos bobinados de control es la misma y la armadura del relé de equilibrio permanece neutra. En estas condiciones, el sistema más idóneo es el circuito de estado sólido a base de tiristores, a pesar de presentar los inconvenientes de su mayor coste y de la necesidad de disponer de dispositivos de protección adecuados contra las tensiones transitorias y los encendidos casuales. Si el par necesario es grande, es preferible emplear un motor de c.c. que tiene la ventaja adicional de reducir la energía cinética del movimiento, gracias a la miniaturización del circuito impreso. Sin embargo, presenta el inconveniente de precisar inevitablemente de conmutador y de escobillas que influyen adversamente en su mantenimiento.

6.6.1.7.3 Tipos de acciones en las válvulas de control.

Según su acción, los cuerpos de las válvulas se dividen en válvulas de acción directa, cuando tienen que bajar para cerrar, e inversa cuando tienen que bajar para abrir. Esta misma división se aplica a los servomotores, que son de acción directa cuando aplicando

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

aire, el vástago se mueve hacia abajo, e inversa cuando al aplicar aire el vástago se mueve hacia arriba (fig. 6.13).



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 o aire para cerrar (acción directa). Consideraciones análogas se aplican a las válvulas con servomotor eléctrico:

Acción directa: con el servomotor des excitado la válvula está abierta; acción inversa: con el servomotor es excitado la válvula está cerrada. Al seleccionar la válvula es importante considerar estos factores desde el punto de vista de seguridad. Ninguna instalación está exenta de averías y una de ellas puede ser un fallo de aire o de corriente de alimentación con lo cual la válvula pasa naturalmente a una de sus posiciones extremas y ésta debe ser la más segura para el proceso. En las válvulas de acción inversa en las que el resorte del servomotor neumático o eléctrico asienta el obturador en el asiento, cerrando la válvula, es importante consultar las tablas del fabricante para

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

comprobar la presión diferencial máxima con que la válvula podrá cerrar. Por ejemplo, en el caso de un intercambiador de calor en el que una alta temperatura sea perjudicial para el producto, interesará que la válvula de control cierre sin aire (válvula neumática) o bien cierre con el servomotor desexcitado (válvula eléctrica). Con la válvula en posición de cierre, la fuga de fluido que se produce está normalizada en la norma ANSI B16.104-1976, en las siguientes clases:

Clase I. Fuga sin especificar.

Clase II. 0.5 % del caudal a apertura total en válvulas de doble asiento, y con asiento metal-metal.

Clase III 1 % del caudal a apertura total en válvulas de doble asiento, y con asiento metal-metal.

Clase IV 0.01 % del caudal a apertura total en válvulas de simple asiento, y con asiento metal-metal

Clase V 5×10^{-4} ml agua/minuto/pulgada de diámetro orificio/psi de presión diferencial, (o 3×10^{-3} ml agua/minuto/mm de diámetro orificio/ bar de presión diferencial) válvulas de simple asiento, y con asiento metal-metal.

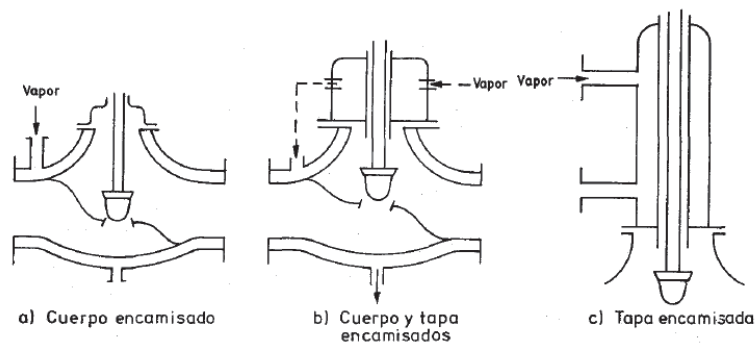
6.6.1.8 Accesorios.

La válvula de control puede tener acoplados diversos tipos de accesorios para realizar funciones adicionales de control. Entre los mismos se encuentran:

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.6.1.8.1 Camisa de calefacción.

Para los fluidos que exigen una temperatura mínima de trabajo (superior a la ambiente) por debajo de la cual se destruyen o se solidifican haciendo imposible el trabajo normal del proceso, es necesario disponer de camisas en el cuerpo o bien incluso en la tapa (tenga o no ésta fuelle de estanqueidad) para permitir la entrada continua de vapor de calefacción. Las conexiones de la camisa a la tubería de vapor son usualmente bridadas según normas DIN o ASA (fig. 6.14).



6.6.1.8.2 Posicionador.

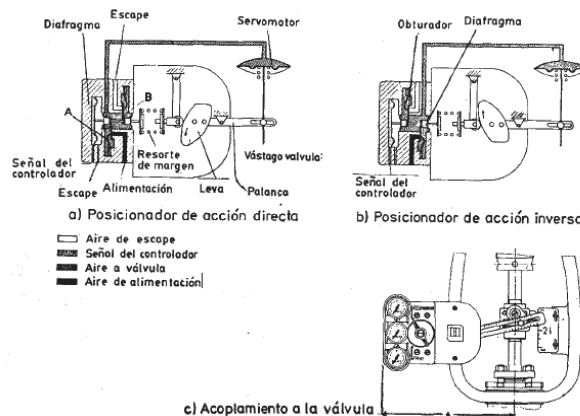
Las fuerzas de desequilibrio que actúan en la válvula de control influyen en la posición del vástago de la válvula y hacen que el control sea errático e incluso inestable. Estas fuerzas de servomotores neumáticos son esencialmente las siguientes:

1. Fuerza de rozamiento del vástago al deslizarse a través de la empaquetadura, variable ,según que el vástago esté en movimiento o parado y según el estado de su superficie.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

2. Fuerza estática del fluido sobre el obturador que depende de la presión diferencial existente, o sea, del grado de abertura de la válvula y de las presiones anterior y posterior a la misma.

El posicionador es generalmente un instrumento neumático del tipo de equilibrio de fuerzas (fig. 6.15). La fuerza ejercida por un resorte de margen, comprimido por una leva unida al vástago de la válvula se equilibra contra la fuerza con que actúa un diafragma alimentado neumáticamente por un relé piloto.



Por ejemplo, en la figura 6.15 a puede verse que cualquier aumento de la señal de salida del controlador de la variable o bien de la estación de mando manual según sea el caso, cambia la señal neumática del piloto, flexa el obturador A y permite la entrada de más aire a la cámara de la válvula. Al bajar el vástago, la nueva fuerza ejercida por el resorte de margen se equilibra con la ejercida por el diafragma del posicionador alimentado por el relé piloto. Por el contrario, al disminuir la señal exterior, baja la señal del relé piloto y el obturador de escape B abre permitiendo el escape de aire de la cámara de la válvula hacia la atmósfera; sube así el vástago hasta que se equilibran de nuevo las fuerzas.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

La forma de la leva determina la relación entre la señal de entrada y la posición del vástago y puede cambiar por completo la curva característica inherente de la válvula.

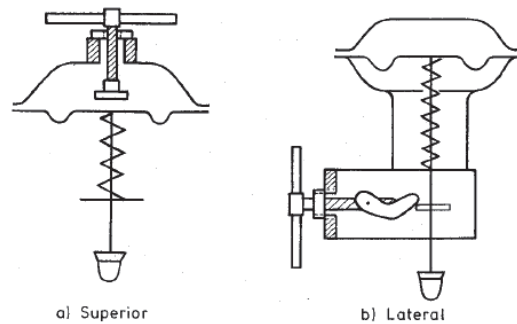
El posicionador inteligente dispone de una interfaz con protocolos de comunicación HART o Fieldbus. Proporciona las siguientes funciones estándar: registro del recorrido del vástago, rozamiento de la estopada, fuerza de asentamiento del obturador, velocidad del vástago, margen de trabajo, accionamiento libre de las alarmas, registro del tiempo de funcionamiento, datos históricos de calibración, configuración de la válvula y base de datos iniciales del fabricante.

Otras funciones avanzadas son: mantenimiento predictivo que permite averiguar el estado de la válvula sin desmontarla (medida de la histéresis, zona muerta y linealidad, gráficos o firmas del posicionador, del asentamiento, del actuador, de la presión de alimentación con relación al recorrido del vástago), diagnóstico del proceso y de las comunicaciones y análisis de fallos.

6.6.1.8.3. Volante de accionamiento manual.

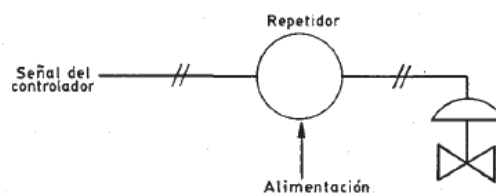
En los casos en que se exige la máxima seguridad de funcionamiento de una instalación y el proceso debe continuar trabajando independientemente de las averías que puedan producirse en el bucle de control es necesario mantener un control de la apertura de la válvula en condiciones de fallo de aire. El volante de accionamiento manual permite realizar esta función; puede ser superior (fig. 6.15 a) o lateral (fig. 6.15 b).

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO



6.6.1.8.4 Repetidor.

El repetidor o booster (fig. 6.16) reduce el tiempo de transmisión de la señal en el bucle de control. Los retardos en la transmisión del controlador a la válvula son debidos a la resistencia interna del controlador, a la capacidad y resistencia del tubo de conexión y a la gran capacidad del servomotor de la válvula.

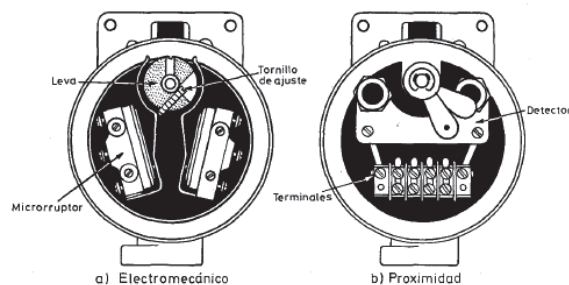


Estas características le permiten aumentar varias veces la velocidad de apertura o de cierre de la válvula, al suprimir prácticamente la gran capacidad de ésta. Como dato orientativo puede indicarse que una válvula de 1" dotada de repetidor necesita sólo 1.5 segundos para efectuar su carrera completa, mientras que una de 2" necesita 6 segundos.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.6.1.8.5 Transmisores de posición y microrruptores de final de carrera.

(38) “Los transmisores de posición transmiten la posición del vástago (y por lo tanto, la apertura de la válvula) al panel de control para información del operador, o para realizar alguna acción de control. Los transmisores de posición neumáticos son idénticos a los posicionadores, mientras que los electrónicos o eléctricos contienen un reóstato, conectado al vástago de la válvula que actúa como divisor de tensión y que proporciona una señal de 4-20 mA c.c. proporcional a la posición de la válvula. Los transmisores de posición optoelectrónicas disponen de un prisma montado en el accionamiento del obturador que refleja el haz luminoso emitido por un LED fijado en el cuerpo de la válvula.”



Los microrruptores de fin de carrera (fig. 6.17) están colocados en el yugo de la válvula y son excitados por una pequeña palanca fijada al vástago. Pueden ser electromecánicos y de proximidad y permiten la señalización a distancia en el panel de control, de la apertura, del cierre o del paso por una o varias posiciones determinadas del obturador de la válvula.

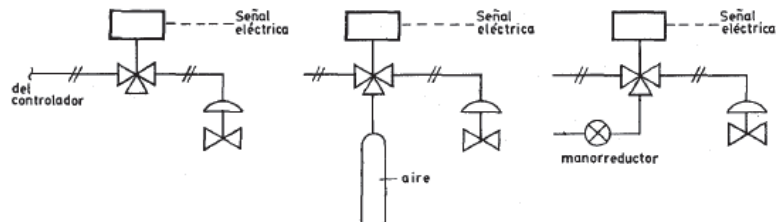
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.6.1.8.6 Válvula solenoide de tres vías.

La válvula de solenoide o solenoide de tres vías (fig. 6.18) permite enclavar la válvula de control en una posición que suele ser la correspondiente a fallo de aire.



En esta maniobra, la excitación de la válvula de solenoide comunica la vía de la cámara del servomotor con la vía conectada a la atmósfera con lo que la válvula de control pierde aire y pasa a la posición de sin aire abre o sin aire cierra (según su acción); la cámara puede también comunicarse con aire a presión pasando así la válvula a la posición inversa de con aire abre o con aire cierra.

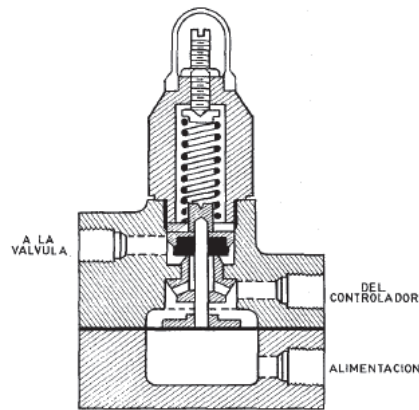


Asimismo, la válvula de solenoide puede estar conectada a un manorreductor; de este modo la válvula de control puede accionarse manualmente independientemente del controlador. Para una máxima seguridad intrínseca la válvula de solenoide está continuamente excitada; de este modo, si falla la corriente la válvula de control pasa a la posición de seguridad.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.6.1.8.7 Válvula de enclavamiento.

Se utiliza cuando el proceso requiere el mantenimiento de la señal neumática en el servomotor en el último valor que tenía antes de que se produjera algún fallo en el suministro de aire.



Bloquea automáticamente el aire entre el controlador y la válvula de control cuando la presión del aire de alimentación disminuye por debajo de un valor prefijado.

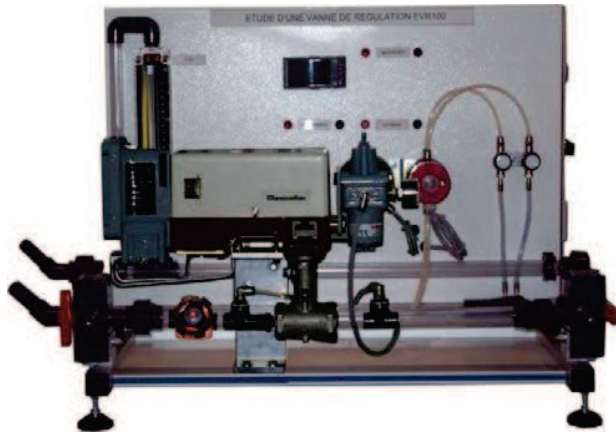
6.1.8.8 Válvula de K_v o C_v , o carrera ajustables.

Existen válvulas de control con el coeficiente C_v o K_v ajustable con una relación que llega a 100:1. En estas válvulas se limita en un valor ajustable la carrera del obturador, con lo que se reduce el valor de C_v o K_v , pero se mantiene la misma señal de control de 4-20 mA c.c. o 0,2-1 bar en toda la carrera ajustada de la válvula, aumentando así la sensibilidad y, por lo tanto, la resolución. En otras palabras, puede variarse la ganancia de la válvula:

$$\frac{\text{Variación de carrera}}{\text{Variación de la señal de control (16mA c.c. o 0.8 bar)}}$$

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Adaptándola así al proceso, lo que facilita que el controlador regule con una menor banda proporcional y una menor acción integral, aumentando así la estabilidad del lazo de control. La variación del C_v o el K_v está dentro de la relación 100:1. En el caso de válvulas de microflujo para muy pequeños caudales, el C_v puede variarse desde 0.0016-0.004 hasta 1.5 – 3.8, y para válvulas de mayor tamaño la variación abarca desde 45 al 800.



Estas válvulas eliminan el sobre dimensionamiento que puede producirse si los datos para el cálculo del coeficiente C_v o K_v son erróneos y se selecciona una válvula mayor de la necesaria.

6.6.1.9. Dimensionamiento de la válvula. Coeficientes K_v y C_v .

6.6.1.9.1 Definiciones.

(39) “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”.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

El primer coeficiente de dimensionamiento de válvula 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 carga de una libra por pulgada cuadrada (psi)”.

En los países que emplean unidades métricas se suele utilizar además el coeficiente K_v , que la norma internacional IEC-534-1987 sobre Válvulas de Control de Procesos Industriales define del siguiente modo:

“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 (10^5 Pa).

El coeficiente K_v para la válvula totalmente abierta se denomina K_{vs} mientras que el mínimo valor recibe el nombre de K_{v0} . Por lo tanto, la relación K_{vs} / K_{v0} es la denominada rangeability o “campo de control” que expresa la relación de caudales que la válvula puede controlar. En las válvulas de control isoporcentuales, esta relación suele valer 30 a 1 o bien 50 a 1 y en las lineales 15 a 1 o 30 a 1. La equivalencia entre los coeficientes K_v y C_v para válvula totalmente abierta es:

$$K_v = 0.86 C_v \text{ (m}^3\text{/h)}.$$

$$C_v = 1,16 K_v \text{ (galones por minuto)}.$$

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.6.1.9.2 Fórmula general.

La válvula se comporta esencialmente como un orificio de paso variable que permite la circulación de un cierto caudal con una determinada pérdida de carga. Aplicando el teorema de Bernouilli en los puntos 1 y 2 de la figura 6.19 resulta:

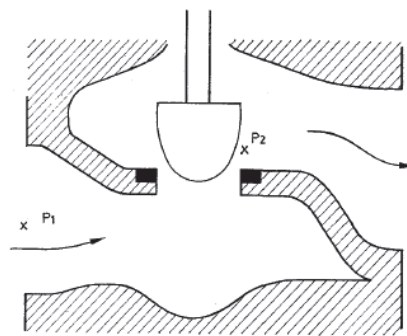
$$\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2}$$

Suponiendo fluidos incompresibles luego: $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ Luego.

$$V_2^2 - V_1^2 = 2 \frac{P_1 - P_2}{\rho}$$

Y como V_2 es mucho mayor que V_1 queda:

$$V_2 = \sqrt{2 \frac{\Delta P}{\rho}} = \sqrt{2gh}$$



En las figuras 6.22 a y b se muestran las estaciones para una válvula en ángulo: En la primera el agua fluye contra el obturador lateralmente y en la segunda lo hace contra la parte superior del obturador. Estas estaciones de ensayo permiten determinar el caudal Q

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

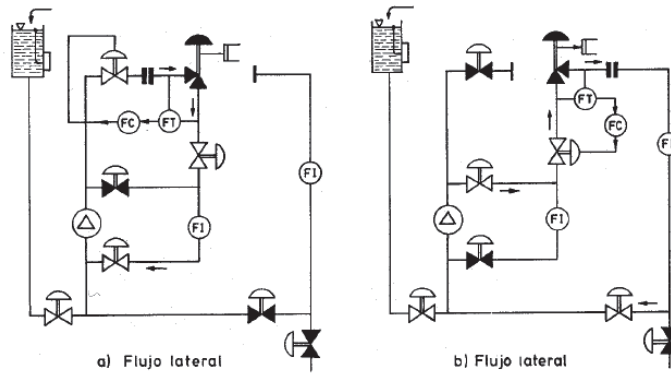
(m³/h) que pasa a través de la válvula de control con una pérdida de carga Δp (bar), con lo cual el coeficiente K_v vale:

$$\frac{K_v}{Q} = \frac{F \cdot v_0}{F \cdot v}$$

En la que:

v = Velocidad del fluido en m/s.

v_0 = Velocidad del fluido en m/s para una pérdida de carga de 1 bar.



Luego:

$$K_v = Q \frac{F \cdot v_0}{F \cdot v} = Q \frac{F \beta \sqrt{\frac{2g}{\rho_0} \Delta p_0 \cdot 10}}{F \beta \sqrt{\frac{2g}{\rho} \Delta p \cdot 10}} = Q \sqrt{\frac{\rho \Delta p_0}{\rho_0 \Delta p}}$$

Y como $\rho_0 = 1 \text{ kg/dm}^3$ e $\Delta p_0 = 1 \text{ bar}$ resulta:

$$K_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}} \quad \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Q = Caudal máximo en m³/h.

ρ = Densidad en kg/dm³ o g/cm³

Δp = Pérdida de carga en bar para el caudal máximo.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Las instalaciones de ensayo descritas no sólo permiten calcular el coeficiente de la válvula K_v para la válvula completamente abierta (K_{vs}) sino también determinar la curva característica inherente que relaciona el porcentaje K_v / K_{vs} . con la relación de posiciones del vástago H/H_{100} de la válvula siendo H_{100} la máxima apertura.

Los fabricantes admiten $\pm 10\%$ de desviación con relación al valor máximo de K_v . Además, el ángulo de desviación de la curva real con relación al ángulo de la curva teórica se fija con una tolerancia de $\pm 30\%$. Cuanta mejor calidad de fabricación tenga la válvula tanto menos se desviará su característica de la curva teórica.

Para la tubería, el aumento de la pérdida de carga es $0.05 P_s - P_b$ como promedio vale:

Válvula	P_b (bar)
Simple asiento	0.7
Doble Asiento	0.5
Jaula	0.3
Mariposa	0.01
Bola en V	0.07

La pérdida de carga asignada a la válvula en posición completamente abierta es:

$$\Delta p = 1.1 \left[\left(\frac{Q_m}{Q_d} \right)^2 - 1 \right] \cdot F + 0.05 P_s + P_b$$

Con lo cual, previa estimación de F y Q_m puede determinarse Δp con mayor precisión.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Por otro lado es conveniente verificar que al caudal máximo del proceso no se le hayan añadido factores de seguridad adicionales. Si fuera así no es necesario aplicar el factor de seguridad indicado. En las fórmulas del caudal, el coeficiente de la válvula es proporcional a la raíz cuadrada de la densidad. Si en un líquido no se conoce la densidad real puede estimarse su valor con un efecto casi despreciable en el cálculo de la capacidad de la válvula. Por ejemplo, una densidad de 0.9 en lugar de 0.8 da lugar a un error menor de 5 % en el caudal. En el caso de un gas, la densidad en condiciones normales de presión y temperatura (1 atmósfera y 15°C) se calcula fácilmente dividiendo su peso molecular por 29.

6.6.1.9.3 Líquidos.

Se aplica la fórmula general ya deducida:

$$K_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}}$$

En la que:

Q = Caudal máximo, en m³/h.

ρ = Densidad, en kg/dm³

Δp = Pérdida de carga, en bar, para el caudal máximo.

EJEMPLO

Calcular el K_v de la válvula para las siguientes condiciones de trabajo:

Caudal máximo = 120000 lts/h a 15°C.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Densidad = 0.9 a 15°C

Temperatura = 80°C

Pérdida de carga $\Delta p = 5$ bar.

Aumentando el caudal dado en 25 % resulta:

$$K_v = 150 \sqrt{\frac{0.9}{5}} = 63.6$$

$$C_v = 1.16 \times 63.6 = 73.7$$

Corrección de viscosidad.

La viscosidad es una medida de la resistencia del fluido que circula. Cuando el líquido tiene una viscosidad superior a 43 centistokes (CS) o 100 Saybolt (SSU), el régimen del fluido pasa a ser prácticamente laminar, en lugar de ser turbulento, con lo que es necesario corregir el valor del K_v . Esto ocurre usualmente a bajos valores del número de Reynolds. Representando la relación entre el coeficiente de descarga F_R (1 = flujo turbulento) y el número de Reynolds correspondiente, se obtiene la curva, en la que pueden verse tres zonas diferenciadas:

En la primera, correspondiente a un flujo laminar, el caudal varía linealmente con la presión diferencial a través de la válvula, en lugar de hacerlo con su raíz cuadrada (ver figura 8.40). En estas condiciones, el valor del caudal es:

$$Q = 218 \frac{\Delta p}{\mu} (F_s \cdot K_v)^{3/2}$$

En la que:

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

μ = Viscosidad cinemática en centipoises.

F_s = Coeficiente de flujo laminar.

La fórmula de cálculo de la válvula para a ser:

$$K_v = \left(\frac{0.0276}{F_s}\right)^3 \sqrt{\left(\frac{\mu \cdot Q}{\Delta p}\right)^2}$$

La segunda, corresponde a un flujo de transición y es una zona empírica que depende de cada tipo de válvula. Para verificar si la zona de trabajo de la válvula es la laminar, o transicional, o turbulenta, se calcula el coeficiente K_v a partir de las expresiones del régimen laminar y del turbulento, que se sustituyen en la siguiente expresión del factor del número de Reynolds.

$$F_r = 1.034 - 0.353 \cdot \left(\frac{K_v \text{ laminar}}{K_v \text{ turbulento}}\right)^{0.615}$$

Si el valor de F_r se encuentra dentro de la zona transicional, se escoge el K_v mayor de los dos calculados para los regímenes laminar y turbulento.

La tercera zona pertenece al régimen turbulento ya estudiado. La equivalencia entre CP, CS y SSU es:

$$CP = \frac{CS}{G}, CP = 0.22G \cdot SSU - \frac{180G}{SSU} \quad \text{con } G = \text{densidad relativa.}$$

EJEMPLO 2

Determinar el K_v de la válvula de globo de simple asiento con fluido tendiendo a abrir.

Caudal máximo = 10000 lts/h a 15°C.

Densidad = 0.95 a 38°C.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Temperatura de trabajo = 38°C .

Δp = 0.35 bar

Viscosidad = 2800 SSU a 38°C = 600 centistokes.

De la tabla 8.11 resulta $F_s = 1.05$. La viscosidad en centipoises es:

$$600 \times 0.95 = 570 \text{ cp.}$$

Aumentando el caudal máximo en 25 % resulta:

$$K_v = 12.5 \sqrt{\frac{0.95}{0.35}} = 20.6 \text{ (Régimen turbulento).}$$

$$K_v = \left(\frac{0.0276}{1.05}\right)^3 \sqrt{\left(\frac{570 \times 12.5}{0.35}\right)^2} = 19.16 \text{ (Régimen laminar).}$$

El factor F_R es igual a:

$$F_r = 1.034 - 0.353 \cdot \left(\frac{19.16}{20.6}\right)^{0.615} = 0.69$$

Lo que corresponde a la zona de transición (figura 8.37)

Escogeremos el valor de $K_v = 20.6$.

Luego $C_v = 1.16 \times 20.6 = 23.9$

Vaporización (flashing).

(40) “El líquido, de acuerdo con su presión y su temperatura, puede existir en estado líquido o de vapor. A temperaturas inferiores al punto de ebullición es un líquido y a temperaturas superiores es un vapor. Por otro lado, el punto de ebullición es función de la

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

presión; cuanto más alta sea ésta, tanto mayor es la temperatura del punto de ebullición. En algunas aplicaciones de las válvulas de control el fluido existe antes de la válvula en estado líquido yaguas abajo en estado de vapor. Es evidente que en estas circunstancias se ha presentado una vaporización parcial o completa en alguna parte de la válvula por la estrangulación que ésta crea, al existir en la salida una presión inferior o igual a la tensión de vapor del líquido a la temperatura de derrame”.

Las fórmulas empíricas son las siguientes:

1. Si la temperatura de entrada es inferior en menos de 2.8°C a la temperatura de saturación del agua, es decir, si $\Delta T < 2.8^{\circ}\text{C}$ (5°F), la pérdida de carga admisible es: $\Delta P = 0.06 P_1$.
2. 2. Cuando la temperatura de entrada es inferior en más de 2.8°C a la temperatura de saturación del agua, es decir, si $\Delta T > 2.8^{\circ}\text{C}$ (5°F), la pérdida de carga admisible es: $\Delta P = 0.9 (P_1 - P_s)$.

En estas fórmulas:

ΔT = Diferencia entre la temperatura de saturación correspondiente a la presión de entrada P_1 y la temperatura de entrada en °C.

P_1 = Presión de entrada en bar absolutos.

P_s = Presión de saturación correspondiente a la temperatura de entrada en kilogramo por centímetro cuadrado absolutos.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Ejemplos.

Determinar el coeficiente de la válvula

Caudal máximo = 16000 lts/h H₂O.

Presión anterior = 8.475 bar absolutos.

Temperatura anterior = 171°C

Caída de presión = 2.1 bar absolutos

En las tablas del vapor de agua, la presión de entrada de 8.475 bar corresponde a una temperatura de vaporización de 172°C. Luego la temperatura anterior es inferior en 1 °C esta temperatura de vaporización.

Luego, ΔP admisible = $0.06 \times 8.475 = 0.5$ bar que comparada con la ΔP real de 2.1 kg/cm² le es inferior.

Luego, aumentando el caudal en 25 % resulta:

$$K_v = 20 \sqrt{\frac{1}{0.5}} = 28.3$$

$$C_v = 1.16 K_v = 33$$

Determinar el coeficiente de la válvula:

Caudal máximo = 55000 lts /h H₂O.

Presión anterior = 11.456 bar absolutos.

Temperatura anterior = 166°C.

Presión posterior = 5 bar absolutos.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

En las tablas del vapor de agua se lee una temperatura de vaporización de 185°C para la presión de entrada de 11.456 kg/cm². La temperatura de entrada es inferior en más de 2.8°C a la de vaporización luego:

$$\Delta P_{admisible} = 0.9 (11.456 - 7.325) = 3.7 \frac{kg}{cm^2} < 6.456 \text{ bar reales}$$

Luego
$$K_v = 68.75 \sqrt{\frac{1}{0.3.7}} = 35.7$$

$$C_v = 1.16 K_v = 41.4$$

habiendo aumentado el caudal en 25 %.

La vaporización de otros líquidos distintos del agua es difícil de evaluar y no existe una fórmula totalmente exacta sino varios métodos empíricos que constituyen una aproximación a la solución del problema.

Cavitación.

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

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

presión” y tal como veremos juega un papel importante en la determinación precisa del tamaño de la válvula cuando se trabaja en estas condiciones.

La cavitación se inicia a presiones estáticas algo superiores a la tensión de vapor del líquido. La vaporización y la cavitación limitan el paso del líquido y el caudal no aumenta a pesar de que baje la presión de salida. En el caso de un gas, la disminución gradual de la presión de salida, manteniendo constante la presión de entrada aumenta la velocidad del fluido en la vena contraída hasta alcanzarse la velocidad del sonido, y a partir de este punto, el caudal de gas no aumenta aunque baje más la presión de salida (caudal estrangulado). Se está en condiciones de caudal crítico con una relación crítica

$R_c = \frac{P_{vc}}{P_1}$ entre la presión en la vena contraída en condiciones de estrangulamiento de

caudal y la presión de entrada del gas que evidentemente es menor que la relación crítica

de presiones $\frac{P_2}{P_1}$ entre la entrada y la salida. La condición de caudal crítico se alcanza,

pues, antes de lo que sería previsible por la relación de $\frac{P_2}{P_1}$.

6.6.1.9.4 Gases.

Los gases son fluidos en estado suficiente de sobrecalentamiento como para que puedan aplicárseles las leyes de los gases perfectos (aire, oxígeno, nitrógeno, argón, helio, etc.).

La fórmula general ya deducida es:

$$K_v = Q_s \sqrt{\frac{q_s}{\Delta p}} \quad \frac{m^3}{h}$$

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Con el caudal Q_s (m^3/h) y la densidad P_s (kg/dm^3) en las condiciones de servicio correspondientes y con Δp en bar para el caudal máximo de paso del fluido a través de la válvula. Esta fórmula puede aplicarse en los gases cuando la presión de entrada es muy próxima a la presión de salida porque en estas condiciones el caudal Q_s y la densidad ρ_s no varían apreciablemente. Si ρ_n es la densidad del gas en condiciones estándar de presión; $P_n = 1$ atmósfera = 1.013 bar y temperatura $T_n = 273^\circ C$ tenemos:

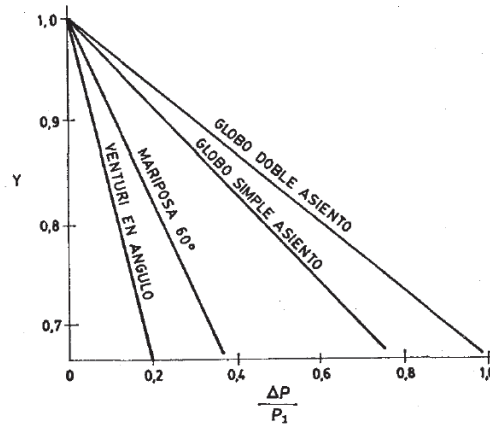
$$\rho_s = \rho_n \frac{P_s}{P_n} \cdot \frac{T_n}{T_s} \quad y \quad Q_s = Q_n \frac{P_n}{P_s} \cdot \frac{T_s}{T_n}$$

Expresando los subíndices s las condiciones de servicio, y los n las condiciones estándar. Señalemos que la densidad ρ_s en las condiciones de servicio está referida a la presión de servicio P_s . Según donde se tome esta presión, la densidad variará ya que al pasar el gas a través de la válvula sufre una pérdida de carga. Si se emplea la densidad anterior a la válvula, como la presión P_1 es mayor, resultará un valor menor en el K_v y la válvula será más pequeña. Si se utiliza la densidad aguas abajo, P_2 es menor, K_v será mayor y la válvula quedará sobredimensionada.

La fórmula del K_v queda:

$$K_v = \frac{Q_s}{Y} \sqrt{\frac{\rho_s}{\Delta p}}$$

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO



Con el caudal Q_s en m^3/h en las condiciones de servicio; ρ_s en kg/dm^3 en las condiciones de servicio, y Δp en bar. Como los gases son fluidos compresibles pueden llegar a alcanzar una velocidad de saturación igual o próxima a la del sonido cuando pasan a través de la restricción que presenta la válvula. La velocidad del gas aumenta a medida que crece la pérdida de carga y la saturación se presenta cuando la presión posterior P_2 baja aproximadamente a 50% o menos de la presión absoluta anterior P_1 es decir, cuando la pérdida de carga Δp iguala o es mayor que $\frac{P_1}{2}$.

Ejemplo.

Determinar el coeficiente de la válvula:

Caudal máximo = 30500 Nm^3/h

Densidad = 0.6 a 15°C.

Temperatura = 15°C

Δp = 2.8 bar

Presión anterior = 7 bar absolutos.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Aplicando la formula $K_v = \frac{Q_n}{328} \sqrt{\frac{G T_s}{\Delta p(P_1 + P_2)}}$ Resulta:

$$K_v = \frac{38125}{328} \sqrt{\frac{0.6 \times 288}{2.8 (7 + 4.2)}} = 273$$

$$C_v = 273 \times 1.17 = 319.$$

Habiendo aumentado el caudal en 25 %. Si utilizáramos el coeficiente de expansión Y resultaría:

$$K_v = 38125 \frac{1.033}{7} \times \frac{1}{Y} \sqrt{\frac{1}{2.8} \times 0.6 \times 0.001293 \times \frac{7}{1.033} \times \frac{288}{288}} = \frac{244}{Y}$$

Y como Y para una válvula de globo con $\frac{\Delta p}{P_1} = \frac{2.8}{7} = 0.4$ vale $Y = 0.82$

$$K_v = \frac{244}{0.82} = 297$$

Y si la válvula fuera de doble asiento, en V, resultaría $Y = 0.86$

$$K_v = \frac{244}{0.86} = 284$$

EJEMPLO.

Determinar las dimensiones de la válvula:

Caudal máximo de cálculo = 3850 Nm³/h

Densidad = 1 a 15°C

Temperatura = 15° C

Δp = 56 bar

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Presión anterior = 70 bar absolutos.

Presión posterior = 14 bar absolutos.

Como el gas está en condiciones de caudal crítico ya que: $\Delta p = 56 \text{ bar} > \frac{70}{2} = 35$

Resulta:
$$K_v = \frac{Q_n}{284} \cdot \sqrt{\frac{GT_s Z}{P_1}} = \frac{3850}{284} \sqrt{\frac{1 \times 288 \times 0.9}{70}} = 3.12$$

$$P_r = \frac{70}{37.8} = 1.85 \quad y \quad T_r = \frac{288}{132} = 2.18$$

$$C_v = 1.16 \times 3.12 = 3.62$$

6.6.1.9.5 Vapores.

(41) “Los vapores son fluidos gaseosos que se encuentran en un estado próximo a la condición de saturación. Como pueden pasar con facilidad al estado líquido se expresan en unidades de peso en lugar de volumen. Los vapores comunes son vapor de agua, amoníaco, cloro, freón, etc. El caudal en peso del vapor equivale a:

$$W \left(\frac{kg}{h} \right) = Q_s \left(\frac{m^3}{h} \right) \times \frac{1000}{V_s \left(\frac{dm^3}{kg} \text{ a presión } P_s \right)}$$

Como la presión P_s , e intermedia entre P_1 y P_2 puede suponerse que $V_s = \frac{V_1 + V_2}{2}$ siendo

V_1 y V_2 los volúmenes específicos del vapor en $\frac{dm^3}{kg}$.

Luego :

$$W \left(\frac{kg}{h} \right) = Q_s \left(\frac{m^3}{h} \right) \times \frac{2000}{(V_1 + V_2) \left(\frac{dm^3}{kg} \text{ a presión } \frac{P_1 + P_2}{2} \right)}$$

Y sustituyendo en la ecuación general del K_v :

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

$$K_v = Q_s \sqrt{\frac{\rho_s}{\Delta p}} = Q_s \sqrt{\frac{1}{\Delta p v_s}} = \frac{W}{2000} (V_1 + V_2) \sqrt{\frac{2}{\Delta p (V_1 + V_2)}} = \frac{W}{1420} \sqrt{\frac{(V_1 + V_2)}{\Delta p}}$$

En la que:

W = Caudal en peso, kg/h

V₁ = Volumen específico a la presión P₁ en dm³/kg.

V₂ = Volumen específico a la presión P₂, en dm³/kg.

ΔP = P₁ - P₂, en bar².

Ejemplo.

Determinar las dimensiones de la válvula:

Caudal máximo = 16400 kg/h

Δp = 9.1 bar

Presión anterior = 26.6 atm.

Presión posterior = 17.5 atm.

Recalentamiento = 93.33°C

Aplicando el caudal máximo: 16400 x 1.25 = 20500 kg/h

$$K_v = \frac{W (1 + 0.0013C)}{16 \sqrt{\Delta p (P_1 + P_2)}} = \frac{20500 (1 + 0.0013 \times 93.33)}{16 \sqrt{9.1 \times (27.6 + 18.5)}} = 70$$

6.6.1.9.6 Régimen bifásico.

Líquido-gas.

Una mezcla líquido-gas tiene un peso específico efectivo ρ_e resultante de la fracción de gas en el líquido. Se supone que el gas es insoluble en el líquido o que sólo se disuelve

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

en una pequeña parte que puede despreciarse, que el líquido no se vaporiza al pasar a través de la válvula y que la velocidad de la mezcla a su paso por la válvula es suficiente para asegurar una buena mezcla turbulenta. Se supone que el peso específico efectivo ρ_e es el promedio de los pesos específicos a la entrada y a la salida de la válvula.

$$\rho_e = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$$

$$\rho_1 = \frac{1}{V_1} = \frac{1}{X_g (V_{g1} - V_l) + V_l} \quad y \quad \rho_2 = \frac{1}{V_2} = \frac{1}{X_g (V_{g2} - V_l) + V_l}$$

$\rho_1 + \rho_2$ = Pesos específicos de la mezcla a la entrada y a la salida de la válvula.

X_g = Fracción en peso del gas.

V_{g1}, V_{g2} = Volumen específico efectivo del gas a la entrada y a la salida de la válvula.

V_l = Volumen específico del líquido.

Luego:

$$K_v = Q_p \frac{1}{\sqrt{\Delta p \rho_e}} = \frac{1.41 Q_p}{\sqrt{\Delta p (\rho_1 + \rho_2)}}$$

Q_p = Tm/h.

Δp = Pérdida de carga en bar para el caudal máximo.

ρ_1, ρ_2 = peso específico en kg/dm^3

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Líquido-vapor.

Cuando una mezcla de líquido y su vapor penetra en la válvula se presenta una vaporización adicional. Actualmente, en el estado alcanzado por la técnica es imposible predecir con exactitud la capacidad de la válvula trabajando en estas condiciones. Uno de los motivos que impide un cálculo exacto de la válvula es la variación tan grande que puede sufrir el peso específico efectivo si cambia la fracción del fluido que se vaporiza. De forma aproximada puede emplearse la fórmula de los líquidos, considerando sólo el peso específico efectivo en la entrada.

$$K_v = \frac{Q_v}{\sqrt{\Delta p \rho_1}}$$

6.6.1.10 Ruido en las válvulas de control.

6.6.1.10.1 Generalidades

En las industrias de proceso intervienen muchos factores que contribuyen al mantenimiento de altos niveles de ruido, entre los cuales, uno de los más importantes es el generado durante el funcionamiento de las válvulas de control instaladas en tuberías que transportan líquidos, gases y vapores. Las leyes y normas aparecidas en la industria sobre el nivel de ruido admisible han contribuido a desarrollar con ímpetu creciente el estudio de su reducción en las válvulas de control. El cálculo del nivel de ruido de las válvulas de control es un problema que actualmente no puede resolverse en forma precisa debido al desconocimiento del valor de los distintos parámetros que intervienen. Los términos más comúnmente empleados son:

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Sonido. Forma de vibración que se propaga a través de medio elástico tal como el aire, por medio de una alternativa compresión y liberación de las moléculas a una frecuencia característica del medio.

Frecuencia del sonido, en Hz. Número de ondas sónicas que pasan por una posición en un segundo, o bien, número de veces con que la presión sónica varía en un ciclo completo (compresión y liberación) por segundo.

Presión del sonido, Ps. La onda sónica tiene una presión que fluctúa por encima y por debajo de la presión atmosférica y que produce la sensación auditiva del sonido. La presión del sonido es el valor cuadrático medio (valor eficaz) de los valores que la presión va tomando al ir variando de un valor alto en la compresión a un valor bajo en la expansión.

Decibelio, dB. Número sin dimensiones que expresa la razón de dos valores numéricos en una escala logarítmica. En acústica, el decibelio relaciona el nivel de presión del sonido o un nivel de potencia sónica con un nivel de referencia seleccionado.

Nivel de presión del sonido, spl (sound pressure level). Expresado en decibelios, el nivel de presión del sonido es 20 veces el logaritmo en base 10 de la relación entre la presión de este sonido y una presión de referencia que se toma generalmente de 0.0002 microbars .

$$dB = 20 \log_{10} \frac{\text{nivel medido}}{\text{nivel de referencia}}$$

El nivel de referencia se toma igual a 2×10^{-5} pascal (N/m²)

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

dB A. Nivel de presión medido en decibelios en la escala “A” de frecuencia de un medidor de nivel de sonido. El circuito “A” simula con mucha aproximación la sensibilidad del oído humano; éste tiene una cresta en la respuesta frecuencial a unos 1000 Hz aproximadamente.

Atenuación. Debilitamiento o reducción del nivel de presión de sonido.

Otros términos empleados:

C_v = Coeficiente nominal de capacidad de la válvula.

P_1 = Presión anterior a la válvula en bar.

P_2 = Presión posterior a la válvula en bar.

P_v = Presión del vapor del fluido, bar.

F_L = Razón de recuperación de presiones en la válvula, sin dimensiones.

Z_1 = Punto de cavitación incipiente.

Z_2 = Punto donde existe el máximo de nivel de presión sónica en el flujo de un líquido.

ΔP = Diferencia de presiones $P_1 - P_2$ en bar.

$\frac{\Delta p}{P_1}$ = Razón de presiones (diferencia de presiones dividida por la presión anterior).

Los valores corrientes del nivel de presión del sonido se encuentran en la tabla 6.1, que figura a continuación:

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

dB	Fuente de Sonido
155	Sirena próxima.
140	Jet (Umbral de dolor).
130	Prensa hidráulica.
70	Oficina ruidosa.
60	Conversación.
80	Tráfico Pesado.

6.6.1.10.2. Causas del ruido en las válvulas.

La alta velocidad de los fluidos en las tuberías es una causa importante del ruido en las válvulas. Sin embargo, no pueden darse reglas de velocidad por la gran cantidad de variables que influyen. Como guía pueden considerarse los siguientes valores:

Líquidos : 1.5-3 m/s a 12-15 m/s.

Gases : 75-120 m/s hasta 0.3 Mach.

Vapor de agua o vapores: 20-30 m/s (hasta 2 bar) 30-50 m/s (saturado hasta 2 bar) 35-100 bar (vapor sobrecalentado hasta 15 bar o 0,15 Mach).

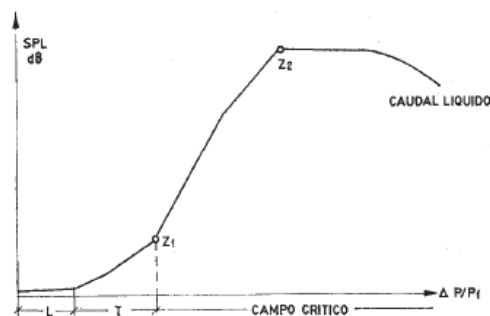
Tres son las causas principales del ruido en las válvulas de control: vibración mecánica, ruido hidrodinámico y ruido aerodinámico.

La **vibración mecánica** es debida a las fluctuaciones de presión casuales que se producen dentro del cuerpo de la válvula y al choque del fluido contra las partes móviles de la misma. Estos fenómenos dan lugar a la vibración del elemento correspondiente.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

La **vibración mecánica** que se presenta con más frecuencia en la válvula es el movimiento lateral del obturador con relación a las superficies de guía. El ruido de esta vibración se parece a un golpeteo metálico y su frecuencia es normalmente menor de 1500 Hz. Otra causa es la entrada en resonancia de un componente de válvula vibrando a su frecuencia natural. El ruido se reconoce por su característica altura de tono de alta frecuencia comprendido normalmente entre 3000 y 7000 Hz. Se produce una alta fatiga mecánica del material que puede llegar a destruirlo.

El **ruido hidrodinámico** es producido por los líquidos al circular a través de la válvula, pudiendo encontrarse en varios estados: sin cavitación, con cavitación, con vaporización, que se representan en la curva que relaciona el cociente de presiones $\frac{\Delta p}{P_1}$ y el nivel del ruido generado (SPL) (fig. 6.23).



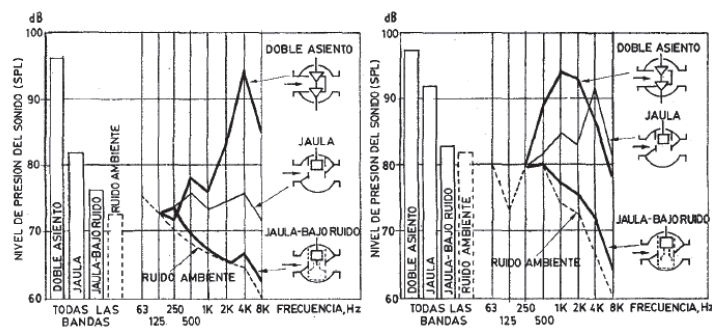
Se encuentra primero una banda estrecha (L) sin casi emisión de sonido, sigue a continuación una banda más ancha (T) en la que aumenta moderadamente el nivel de ruido y a partir de un cierto punto Z_1 , el ruido aumenta bruscamente para alcanzar un valor máximo Z_2 . La cavitación iniciada en el punto Z_1 tiene lugar en dos etapas. En la primera el fluido alcanza su máxima velocidad al pasar a través del orificio interno

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

existente entre el obturador y el asiento y si esta velocidad es suficiente, la presión en la vena contraída puede reducirse a la presión de vaporización del líquido pasando éste al estado de vapor en forma de burbujas. La segunda etapa tiene lugar aguas abajo donde el fluido disminuye su velocidad y aumenta paralelamente su presión por encima de la presión de vapor y las burbujas formadas anteriormente se aplastan. La cavitación puede provocar graves daños y problemas importantes de vibración en las válvulas de control. Sin embargo, es fácil evitarla seleccionando adecuadamente los límites en las condiciones de servicio.

6.6.1.10.3 Reducción del ruido.

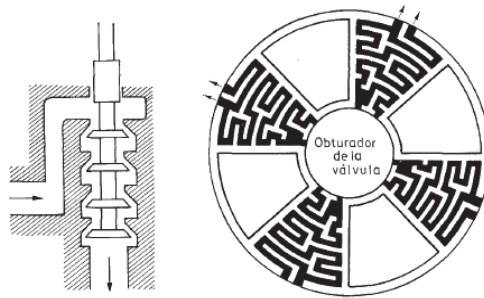
La reducción del ruido en las válvulas de control se logra bien atacando la fuente de ruido, o bien atenuando la transmisión del sonido. En el primer caso se suele utilizar una válvula de bola o rotativa con el obturador perforado o un obturador del tipo jaula (fig. 6.24), dotado de múltiples orificios de forma variada parecidos a panales de abeja.



Con un cuerpo de tamaño adecuado y con este tipo de obturador es fácil disminuir el ruido en unos 20 dB en comparación con una válvula de globo convencional seleccionada teniendo en cuenta sólo su capacidad. En otros tipos de válvulas (fig. 6.25)

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

se emplean conductos laberínticos en las partes internas entre el obturador y los asientos para aumentar la resistencia hidráulica del fluido y limitar su velocidad reduciendo así el ruido.



Un conducto laberíntico complejo es el formado por un conjunto de discos con canales incorporados o cortados que forman pasos múltiples. De este modo se reduce la velocidad y se aumentan las pérdidas por transmisión al incrementar la frecuencia.

6.6.2. Elementos finales electrónicos.

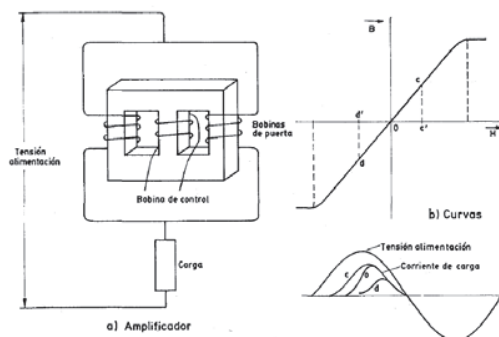
En los procesos industriales altamente sofisticados, tales como hornos, tratamientos térmicos, máquinas de extrusión, máquinas de hilar fibra sintética, etc., la regulación precisa de la variable controlada (suele ser la temperatura) obliga a controlar la potencia entregada a las resistencias finales de calefacción. Los primeros elementos que salieron al mercado y que permitieron el control continuo de la potencia (sin considerar el control todo-nada) fueron el tiratrón y el ignitrón que eran respectivamente un tubo de vacío lleno de gas y un tubo con mercurio; sus dimensiones eran demasiado grandes y su costo excesivo para las potencias que se necesitaban. Apareció después el amplificador magnético o bobina saturable de bajo costo relativo, que ha sido realmente un equipo

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

robusto que ha aportado la primera solución práctica de aplicación industrial. El rectificador controlado de silicio apareció hace pocos años, ha representado una revolución en el control de potencia por sus dimensiones reducidas y por trabajar con una alta densidad de corriente. Características que entre otras que se verán hacen que sea el más utilizado actualmente. Estos elementos se comportan en forma parecida a una válvula de control: varían la corriente en la línea de alimentación a la carga en la misma forma en que una válvula cambia el caudal de fluido en un tubería.

6.6.2.1 Amplificador magnético saturable.

El amplificador magnético saturable puede describirse básicamente como un dispositivo magnético con un núcleo de láminas de hierro y dos pares de bobinados, uno en serie con la carga llamado bobinado de carga y el otro que cambia el flujo magnético del aparato y que se denomina bobinado de control (fig. 6.26 a). Al variar la señal de salida de 4 a 20 mA c.c. del controlador en el bobinado de control cambia el grado de saturación del núcleo, con lo cual el circuito de carga pasa a tener entonces una impedancia elevada si el núcleo no está saturado o bien una impedancia variable que disminuirá a medida que aumente la saturación del núcleo (fig. 6.26 b).



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

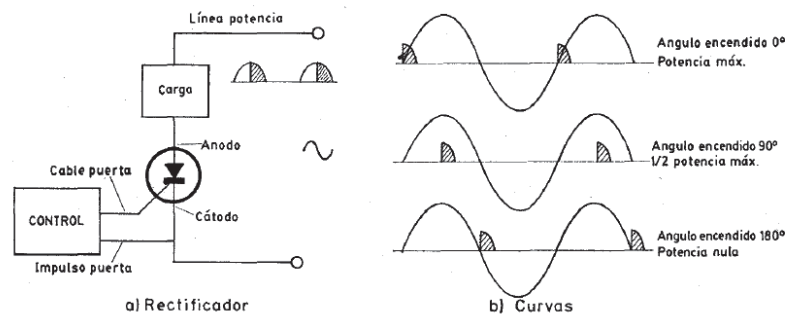
Así, pues, la señal del controlador fijará el punto de arranque o de cebado en la curva de imantación. Si además es grande la relación entre las espiras del bobinado de control y las del bobinado de carga, una pequeña intensidad de corriente controlará un valor muy elevado en la intensidad de salida y será posible gobernar una potencia considerable en la carga. Para obtener un buen rendimiento en el control, la carga debe absorber una potencia que no baje de 50 % de la potencia nominal del amplificador magnético. Las desventajas mencionadas de tamaño excesivo, campo de control de 10 a 90 % de la tensión de línea, imposibilidad de cortar totalmente la alimentación a la carga y necesidad de seleccionar el tamaño para que la potencia desarrollada se acople bien a las necesidades de la carga, han eliminado gradualmente el empleo del amplificador magnético saturable en muchas aplicaciones en beneficio del rectificador controlado de silicio.

6.6.2.2 Rectificadores controlados de silicio.

Los rectificadores controlados de silicio o SCR (*silicon controlled rectifier*) o tiristores se han desarrollado rápidamente en el campo de control de potencia, sustituyendo gradualmente al amplificador magnético gracias a sus mejores características. Emplean rectificadores de silicio que bloquean el paso de la corriente en sentido inverso, igual que los convencionales, pero que además la bloquean en sentido directo hasta tanto no se aplica una pequeña señal en el cable de control o puerta. Una vez el rectificador pasa al estado de conducción la señal puede desconectarse y aquel continuará en el mismo estado hasta tanto la corriente no cambie de sentido. No hay nuevo paso de corriente si la

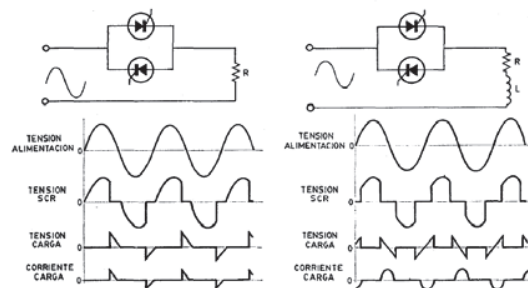
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

excitación no enciende nuevamente el rectificador (fig. 6.27 a). Existen dos sistemas de encendido: por ángulo de desfase entre la corriente alterna de carga y el impulso de excitación (phase control) y por encendido discreto con disparo en el instante de cruzar el valor cero la corriente alterna de carga (*zero cross switching*).



En el sistema de ángulo de fase, la carga se alimenta con una corriente alterna recortada en un porcentaje controlado en cada ciclo. La señal de puerta que selecciona la parte deseada de potencia de esta corriente de alimentación de la carga, es un impulso de corta duración y a la misma frecuencia de la corriente. En la figura 6.27 b puede verse la zona de conducción de la onda de corriente según el ángulo de encendido.

Para aprovechar el hemiciclo negativo se suele utilizar otro elemento SCR en oposición o bien su equivalente, una unidad triac. El sistema de encendido de ángulo de fase puede aplicarse en el control de cargas resistivas e inductivas. En las figuras 6.28a y 6.28b se representa el control de éstas con las ondas de tensión y corriente correspondientes.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Se observará que la forma de la onda de la corriente de carga tiene muchos armónicos debido a que queda muy recortada. Esta forma de onda produce interferencias electromagnéticas ya que la corriente de carga crece abruptamente al pasar del valor cero al valor nominal en unos pocos microsegundos, desarrollando así unas potencias transitorias y una distorsión importantes que pueden afectar el funcionamiento de otros aparatos de control que se alimenten de la misma fuente. Un circuito de filtrado puede reducir la energía de interferencia, pero si la potencia de carga es elevada el filtro llega a ser voluminoso y caro, inclinándose la selección al sistema de encendido discreto por disparo al paso de cero, una de cuyas características es la eliminación virtual de las interferencias de radiofrecuencia. En el circuito de encendido discreto por paso de cero (zero cross switching) la corriente alterna es entregada a la carga en forma de paquetes de ondas discontinuas. Este tren de ondas se genera mediante una excitación continua o bien por medio de impulsos sincronizados que actúan antes de que la tensión de línea cruce el valor cero, en lugar de un impulso sincronizado en fase como ocurría en el sistema de ángulo de fase. La señal de excitación mantiene el tiristor o el triac encendidos y al anularse aquélla, éstos dejan de conducir. El sistema se emplea típicamente en control proporcional en tiempo: se emiten una señal continua o una serie de impulsos sincronizados, antes de que la tensión de línea cruce el valor cero, en número proporcional a la señal de control de 4-20 mA c.c. Si esta señal es, por ejemplo de 12 mA c.c. y la base de tiempos o duración del ciclo es de 1 segundo, a la carga pasarán 25 ciclos “on” y dejarán de pasar 25 ciclos “off”.

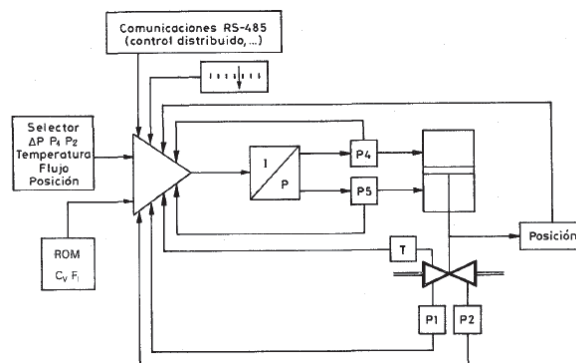
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Las características de aplicación de los SCR son las siguientes:

- Ganancia extremadamente alta con un límite de 10000 o superior.
- Su linealidad es excelente, de $\pm 2\%$ en todo el campo de medida.
- Su salida mínima es de 0V. Ello indica que la potencia de alimentación a la carga puede anularse completamente.
- Bajas caídas de tensión de modo que a la carga puede aplicársele de 96 a 99 % de la tensión de línea.
- El tiempo de respuesta es corto, del orden de varios ciclos (1/50 s).
- Son de pequeño tamaño.
- Necesitan una protección contra corrientes transitorias.
- Su potencia nominal debe disminuirse si aumenta la temperatura de servicio.

6.6.2.3 Válvula inteligente.

Aparecida gracias al desarrollo de los microprocesadores, contiene un controlador digital, y sensores de medición de temperatura, caudal y presión montados en la propia válvula. El controlador digital controla la presión manométrica antes o después del orificio de la válvula, y la temperatura o el caudal, y envía la señal de salida al módulo del posicionador electroneumático acoplado al actuador.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

La válvula inteligente acepta la entrada del valor externo del punto de consigna y la comunicación digital a través de la interfaz RS-485 con el protocolo adecuado para comunicarse con los sistemas de control distribuido. De este modo, accede a los valores de la variable de proceso, el punto de consigna y las alarmas. La válvula inteligente puede efectuar un diagnóstico de sí misma al medir la carrera del vástago y las presiones del actuador. Puede captar el excesivo rozamiento del vástago o el pegado de las partes internas. Además permite llevar el proceso a una condición de seguridad en el caso de problemas graves.

6.6.3 Otros elementos finales de control.

(42) “Otros elementos que constituyen una alternativa a las válvulas de control son:

Bombas dosificadoras accionadas por actuadores neumáticos o electrónicos y utilizadas principalmente en el envío de cantidades precisas de líquidos para mezclas, en casos tales como el control de pH, tratamiento de aguas, adición de productos en la industria alimenticia, etc., aplicaciones que se caracterizan por bajos caudales, altas presiones, altas viscosidades, etc.

Actuadores de velocidad variable que gobiernan la velocidad de bombas centrífugas, ventiladores, compresores, etc., variando así el caudal de fluido, y que presentan la ventaja de evitar la pérdida de energía que necesariamente absorben las válvulas de control”.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.7.REGULACION AUTOMATICA.

6.7.1.Introducción.

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.

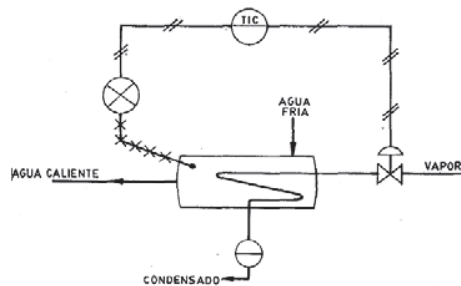
6.7.2 Características del proceso.

El bucle de control típico está formado por el proceso, el transmisor, el controlador y la válvula de control. El proceso consiste en un sistema que ha sido desarrollado para llevar a cabo un objetivo determinado: tratamiento del material mediante una serie de operaciones específicas destinadas a llevar a cabo su transformación. Los procesos revisten las formas más diversas, desde las más simples hasta las más complejas. Una aplicación típica que consideraremos repetidamente a lo largo del texto la constituye un intercambiador de calor, tal como el de la figura 7.1.

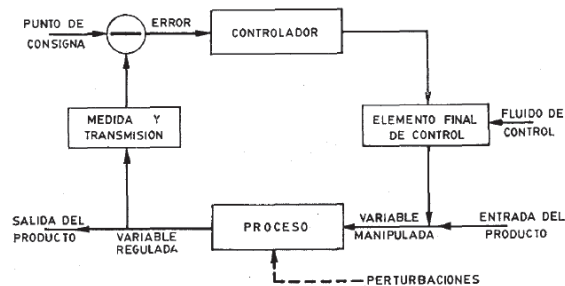
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

El controlador permite al proceso cumplir su objetivo de transformación del material y realiza dos funciones esenciales:

- Compara la variable medida con la de referencia o deseada (punto de consigna) para determinar el error.
- Estabiliza el funcionamiento dinámico del bucle de control mediante circuitos especiales para reducir o eliminar el error.

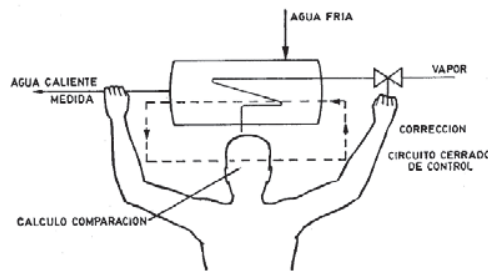


Un circuito abierto de regulación carece de detector de señal de error y de controlador. Si cambia cualquiera de estas condiciones, la temperatura de salida del agua debe variar.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

La figura 7.2 representa el control manual del intercambiador. El operario nota la temperatura de salida del agua con la mano y acciona la válvula de vapor para mantener el agua a la temperatura deseada.



Los procesos presentan dos características principales que deben considerarse al automatizarlos:

- a) Los cambios en la variable controlada debido a alteraciones en las condiciones del proceso y llamados generalmente cambios de carga,
- b) El tiempo necesario para que la variable del proceso alcance un nuevo valor al ocurrir un cambio de carga. Este retardo se debe a una o a varias propiedades del proceso: capacitancia, resistencia y tiempo de transporte.

Cambios de carga. La carga del proceso es la cantidad total del fluido o agente de control que el proceso requiere en cualquier momento para mantener unas condiciones de trabajo equilibradas. En el ejemplo anterior, cuando el agua fría circula con un determinado caudal y la salida de agua caliente debe estar a una temperatura dada, es necesaria una determinada cantidad de vapor. En estas condiciones, un aumento en el caudal de agua da lugar al consumo de más cantidad de vapor y constituye por tanto un

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

cambio en la carga del proceso. Por otro lado, un aumento en la temperatura de entrada del agua fría, precisa una menor cantidad de vapor y es también un cambio de carga.

En general, los cambios de carga del proceso son debidos a las siguientes causas:

1. **Mayor o menor demanda del fluido de control por el medio controlado.** En el ejemplo del intercambiador de calor de la figura 7.1, un aumento en el caudal de agua o una disminución en su temperatura da lugar a un cambio de carga porque requiere el consumo de más cantidad de vapor.

2. **Variaciones en la calidad del fluido de control.** Una disminución de presión en el vapor del ejemplo de la figura 7.1 da lugar a un aumento del caudal en volumen del vapor para mantener la misma temperatura controlada, ya que las calorías cedidas por el vapor al condensarse disminuyen al bajar la presión.

3. **Cambios en las condiciones ambientales.** Son muy claros en el caso de instalaciones al aire libre donde las pérdidas de calor por radiación varían mucho según la estación del año, la hora del día y el tiempo.

4. **Calor generado o absorbido por la reacción química del proceso (proceso exotérmico o endotérmico respectivamente).** Se presenta un cambio de carga porque el proceso necesita una menor o una mayor cantidad del agente de control.

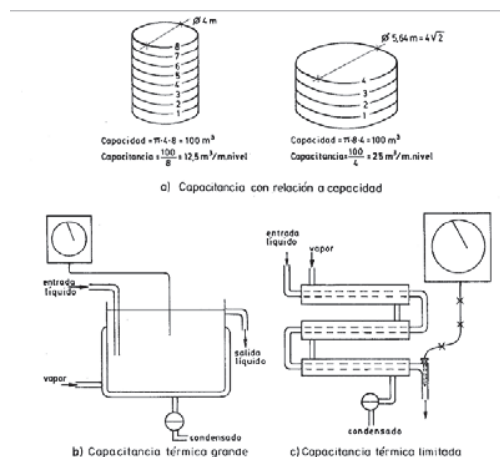
Los cambios de carga en el proceso pueden producir perturbaciones en la alimentación y en la demanda. Las perturbaciones en la alimentación consisten en un cambio en la energía o en los materiales de entrada en el proceso. Por ejemplo, las variaciones en la

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

presión de vapor o en la apertura de la válvula de vapor son perturbaciones en la alimentación del proceso. Las perturbaciones en la demanda consisten en un cambio en la salida de energía o de material del proceso. Los cambios en la temperatura del agua fría y las variaciones en el caudal de agua pertenecen a este tipo.

Capacitancia. La capacitancia de un proceso es un factor muy importante en el control automático. Es una medida de las características propias del proceso para mantener o transferir una cantidad de energía o de material con relación a una cantidad unitaria de alguna variable de referencia. No debe confundirse con capacidad del proceso que representa simplemente las características propias de almacenar energía o material.

Por ejemplo, los dos depósitos de la figura 7.3 a tienen la misma capacidad de 100 m^3 , pero tienen distinta capacitancia por unidad de nivel: $12,5 \text{ m}^3/\text{m}$, nivel el más alto y $25 \text{ m}^3/\text{m}$, nivel el más bajo. En un proceso, una capacitancia relativamente grande es favorable para mantener constante la variable controlada a pesar de los cambios de carga que puedan presentarse.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Sin embargo, esta misma característica hace que sea más difícil cambiar la variable a un nuevo valor, e introduce un retardo importante entre una variación del fluido de control y el nuevo valor que toma la variable controlada. En las figuras 7.4 b y c pueden verse dos procesos con dos tipos de capacitancias térmicas, una grande y la otra limitada, respectivamente.

En la figura 7.4 b el tanque contiene una gran cantidad de líquido de tal modo que esta masa considerable del líquido estabiliza y resiste los cambios que puedan causarse a la temperatura por variaciones en el caudal del líquido, en la presión del vapor o en la temperatura ambiente. Estas mismas perturbaciones aplicadas al intercambiador de la figura 7.4 c influyen poderosamente en la temperatura al ser pequeña la masa del líquido. Si este último proceso se controlara manualmente, el operador debería estar muy atento y le sería casi imposible mantener la temperatura en un valor constante.

Resistencias. La resistencia es la oposición total o parcial de la transferencia de energía o de material entre las capacitancias. En la figura 7.1, las capacitancias son el serpentín de vapor y el tanque, y su resistencia se manifiesta porque las paredes de los tubos del serpentín de vapor y las capas aislantes de vapor y de agua que se encuentran a ambos lados de los mismos, se oponen a la transferencia de energía calorífica entre el vapor del interior de los tubos y el agua que se encuentra en el exterior.

Tiempo de transporte. En el intercambiador de calor de la figura 7.1, si disminuye la temperatura del agua de entrada, pasará cierto tiempo hasta que el agua más fría pueda circular a través del tanque y alcance la sonda termométrica. Hay que hacer notar que

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

durante el tiempo de transporte, la sonda termométrica no capta ningún cambio en la temperatura. El valor del tiempo de retardo depende a la vez de la velocidad de transporte y de la distancia de transporte.

Si el agua circula con una velocidad de un metro por segundo, con el bulbo a tres metros del tanque, el tiempo de transporte es de 3 s. Si el bulbo está en el punto B, a 10 m del tanque, el tiempo será de 10 s.

6.7.3 Sistemas de control neumáticos y eléctricos.

En el control manual, descrito en la figura 7.2, el operador puede hacer las correcciones en la válvula de vapor de varias formas:

1. Puede abrir o cerrar instantáneamente la válvula.
2. Puede abrir o cerrar la válvula lentamente, a una velocidad constante, mientras se mantenga la desviación.
3. Puede abrir la válvula en mayor grado cuando la desviación es más rápida.
4. Puede abrir la válvula un número de vueltas constante, por cada unidad de desviación.

Asimismo el operador puede emplear otros métodos o combinaciones en la manipulación de la válvula. En los sistemas industriales se emplea uno o una combinación de los siguientes sistemas de control:

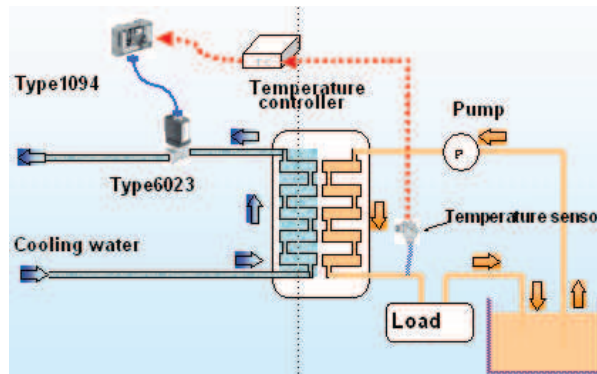
- a. De dos posiciones (todo-nada).
- b. Proporcional de tiempo variable (anticipatoria).
- c. Flotante.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

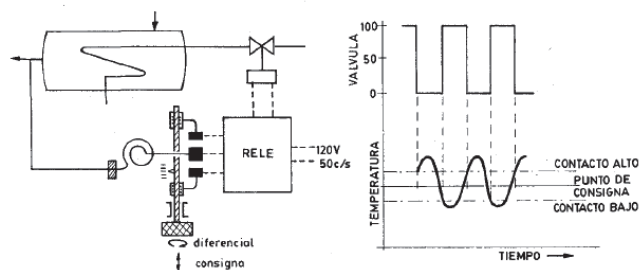
- d. Proporcional.
- e. Proporcional + integral.
- f. Proporcional + derivada.
- g. Proporcional + integral + derivada.

6.7.3.1 Control todo-nada.

En la regulación todo-nada el elemento final de control se mueve rápidamente entre una de dos posiciones fijas a la otra, para un valor único de la variable controlada. En la figura 7.4 se representa un control de este tipo, que se caracteriza por un ciclo continuo de variación de la variable controlada.



Este tipo de control se emplea usualmente con una banda diferencial (fig. 7.5) o zona neutra en la que el elemento final de control permanece en su última posición para valores de la variable comprendidos dentro de la banda diferencial.



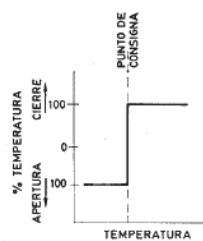
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Los ajustes de control se basan en variar el punto de consigna y la gama diferencial. El control todo-nada funciona satisfactoriamente si el proceso tiene una velocidad de reacción lenta y posee un tiempo de retardo mínimo. Se caracteriza porque las dos posiciones extremas de la válvula permiten una entrada y salida de energía al proceso ligeramente superior e inferior respectivamente a las necesidades de la operación normal. La situación de la válvula de control puede contribuir también al tiempo. Es evidente que la variable controlada oscila continuamente y que estas oscilaciones variarán en frecuencia y magnitud si se presentan cambios de carga en el proceso.

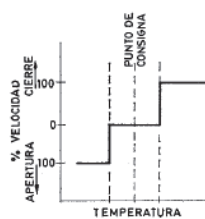
6.7.3.2 Control flotante.

El control flotante, denominado realmente control flotante de velocidad constante (fig. 7.6 a), mueve el elemento final de control a una velocidad única independiente de la desviación. Por ejemplo, una regulación 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).

El control flotante de velocidad constante con una zona neutra (fig. 7.6 b) se obtiene al acoplar a un control todo-nada con una zona neutra una válvula motorizada reversible de baja velocidad.



a) Velocidad constante



b) Velocidad constante con zona neutra

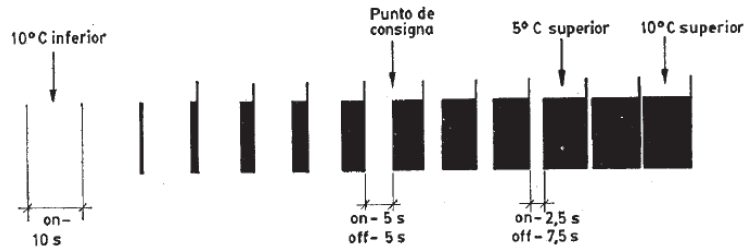
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

La válvula permanece inmóvil si la variable queda dentro de la zona neutra y cuando la rebasa, la válvula se mueve en la dirección adecuada hasta que la variable retorna al interior de la zona neutra, pudiendo incluso la válvula llegar a alcanzar sus posiciones extremas de apertura o de cierre. El control flotante, análogamente al control todo-nada, tiende a producir oscilaciones en la variable controlada, pero estas oscilaciones pueden hacerse mínimas eligiendo adecuadamente la velocidad del elemento final para que compense las características del proceso. En general, la válvula debe moverse a una velocidad lo suficientemente rápida para mantener la variable. La ventaja principal del control flotante 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.

6.7.3.3 Control proporcional de tiempo variable.

(43) “En este sistema de regulación 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. Es decir, la relación del tiempo de conexión al de desconexión final es proporcional al valor de la variable controlada. La longitud de un ciclo completo (conexión + desconexión) es constante pero la relación entre los tiempos de conexión a desconexión dentro de cada ciclo varía al desviarse la variable controlada del punto de consigna. En la figura 7.7 puede verse un ejemplo de este controlador que tiene un ciclo completo de 10 segundos y una banda proporcional de $20^{\circ} C$ ”.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

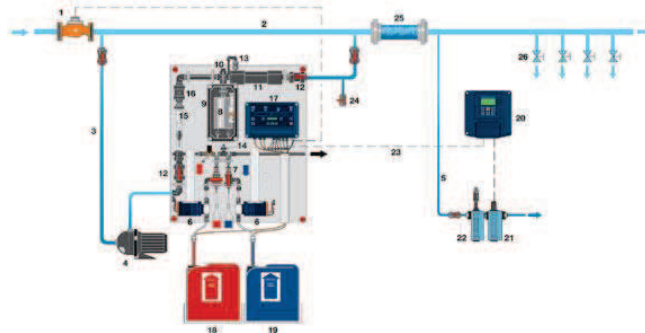


En el punto de consigna el controlador conecta el elemento final durante 5 segundos y 10 desconecta 5 segundos y así sucesivamente. Si la temperatura disminuye 10° C el elemento final está siempre conectado. A 5°C por encima del punto de consigna el elemento final está conectado sólo 2.5 segundos, desconecta durante 7.5 segundos y así sucesivamente. Este tipo de control se emplea sólo en controladores eléctricos. Un caso típico de aplicación lo constituye la regulación de temperatura de un horno eléctrico en que el elemento final es una resistencia o un conjunto de resistencias de calefacción.

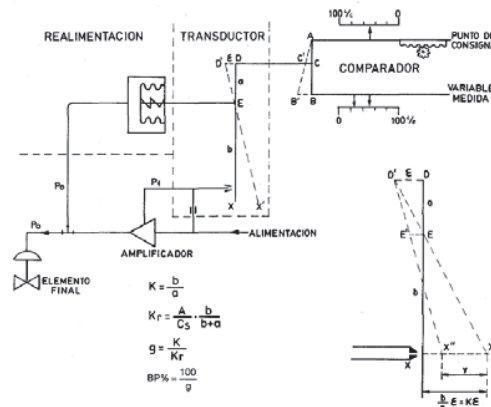
6.7.3.4 Control proporcional.

En el sistema de posición proporcional, existe una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control (dentro de la banda proporcional). Es decir, la válvula se mueve el mismo valor por cada unidad de desviación. En la figura 7.8 puede verse la forma en que actúa un controlador proporcional cuyo punto de consigna es 150° C y cuyo intervalo de actuación es de 100 - 200° C. Cuando la variable controlada está en 100° C o menos la válvula está totalmente abierta; a 200°C o más está totalmente cerrada; y entre 100 y 200°C la posición de la válvula es proporcional al valor de la variable controlada. Por ejemplo, a 125°C está abierta en un 75 % ; a 150°C en un 50%.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO



En la figura 7.9 puede verse un controlador proporcional neumático típico compuesto de un comparador, un transductor y una realimentación.



El comparador establece la diferencia o señal de error entre la variable controlada y el valor deseado de la variable o punto de consigna (desplazamiento del punto C a C' o D o D' en la figura). El transductor, ante esta señal de error, como el punto E está inicialmente fijo en el espacio, hace que el obturador se separe de la tobera pasando ésta al punto X'. Esta nueva separación disminuye la presión posterior P₁ y a través del amplificador neumático hace bajar P₀. En el circuito de realimentación, el nuevo valor de la presión de salida P₀ expansiona el fuelle, desplazando el punto E a E', con lo cual el obturador toma otra posición de equilibrio a nivel de la tobera definida por el punto X''.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Luego: $x = K \varepsilon - y$ siendo K el factor de amplificación del error a nivel de la tobera

$$K = \frac{b}{a}$$

Ante esta señal de error, la presión posterior P_1 varía en $\Delta P_1 = K_t(K\varepsilon - y)$ siendo K_t el

factor de conversión del conjunto tobera-obturador. La variación en la señal de salida es:

$\Delta P_1 = K_t(K\varepsilon - y)$ siendo K_a el factor de amplificación de la válvula piloto o amplificador, y como

$$y = \Delta P_0 \frac{A}{C_s} \cdot \frac{b}{b+a} = \Delta P_0 K_r$$

Siendo:

A = Área del fuelle.

C_s = Constante elástica del resorte.

K_r = El factor de amplificación o ganancia de la realimentación a nivel de la tobera

$$K_r = \frac{A}{C_s} \cdot \frac{b}{b+a}$$

Resulta:

$$\Delta P_0 = K_t K_a K \varepsilon - K_t K_a K_r \Delta P_0$$

Y de aquí:

$$\Delta P_0 = \frac{K_t K_a K}{1 + K_t K_a K_r} \varepsilon = \frac{K}{\frac{1}{K_t K_a} + K_r} \varepsilon = \frac{K}{K_r} \varepsilon = g \varepsilon$$

Ya que el factor de amplificación K_t es muy grande, y habiendo llamado g = ganancia a la relación $\frac{K}{K_r}$.

La **ganancia** del controlador proporcional es, pues, la relación entre la variación en la señal de salida y el error que la produce (diferencia entre la variable y el punto de consigna). El término ganancia se utiliza en el control digital. Muchos controladores

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

neumáticos y electrónicos emplean en lugar de ganancia la denominada banda proporcional que es la inversa de la ganancia:

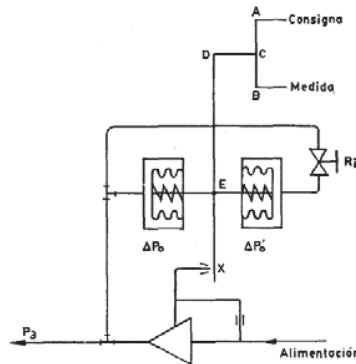
$$BP\% = \frac{100\%}{K}$$

Y cuya definición es: **Banda proporcional** es el porcentaje de variación de la variable controlada necesaria para provocar una carrera completa del elemento final de control. El valor de la banda proporcional de un instrumento particular, se expresa usualmente en tanto por ciento de su campo de medida total. El offset es una característica indeseable del control proporcional. Se indican los regímenes de carga, temperatura y la posición de la válvula de control para el intercambiador de calor de la figura 7.1. Inicialmente, el de consigna está en el valor deseado de 100° C. Al cabo de un tiempo se presenta un cambio de carga, originado, por ejemplo, por un aumento en el consumo de agua caliente, por apertura simultánea de mayor número de válvulas de consumo. Nótese que la temperatura no vuelve al valor de consigna, sino que la misma se estabiliza a los 90° C.

6.7.3.5 Control proporcional + integral.

(44) “En el control integral, el elemento final se mueve de acuerdo con una función integral en el tiempo de la variable controlada. En la figura 7.10 puede verse un controlador neumático típico proporcional más integral. Se observará que se diferencia con relación al controlador proporcional de la figura 7.2 en la adición de un segundo fuelle dotado de una restricción variable que realimenta positivamente la señal de salida.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO



La combinación de la restricción R_1 con la capacidad del fuelle da lugar a una función de retardo con una constante de tiempo t'' .

Cuando existe una pequeña diferencia de presiones ($P - P'$) entre la entrada y el interior del fuelle, el caudal Q que pasa a través de la restricción capilar R corresponde a un régimen laminar por lo cual existe la relación.

$$P - P' = R \cdot Q$$

Siendo R la resistencia de la restricción.

Este caudal introduce en el fuelle una cantidad de aire $Q dt$ por unidad de tiempo dt , dando lugar a una variación de presión dP' . El sistema se comporta como un condensador eléctrico de capacidad C que se cargará con una intensidad Q ante una diferencia de tensiones dP' . Luego: $C = \frac{Q dt}{dP'}$ que sustituida en (1) da: $P - P' = RC \frac{dP'}{dt}$ o sea, $P = P' +$

$RC \frac{dP'}{dt}$ y como en electricidad la combinación de una resistencia R y una capacitancia C

introduce una constante de tiempo t resulta: $P = P' + t_1 \frac{dP'}{dt}$. Y si en esta ecuación

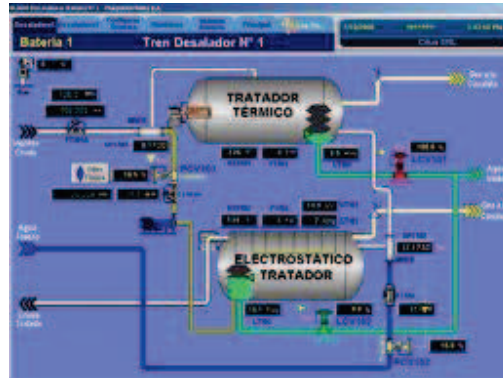
se introducen valores instantáneos se obtiene:

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

$$P_0 + \Delta P = P_0 + \Delta P' + t_1 \frac{d(P_0 + \Delta P'')}{dt}$$

Es decir:

$$\Delta P = \Delta P' + t_1 \frac{d\Delta P''}{dt}$$



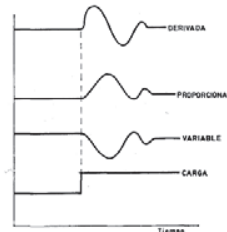
Examinando la figura 7.10 y siguiendo el mismo razonamiento que en el controlador proporcional de la figura 7.8 puede deducirse que ante un error ε entre la variable y el punto de consigna, el desplazamiento final “y” del obturador es la resultante entre la realimentación negativa “i” del fuelle de acción proporcional de la izquierda de la figura y la realimentación positiva “d” del fuelle de acción integral dibujado a la derecha.

6.7.3.6 Control proporcional + derivado.

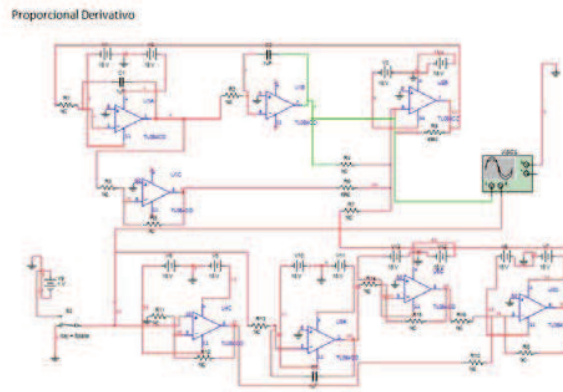
En la regulación derivada existe una relación lineal continua entre la velocidad de variación de la variable controlada y la posición del elemento final de control. Es decir, el movimiento de la válvula es proporcional a la velocidad de cambio de la variable, por ejemplo, la temperatura, cuanto más rápidamente varíe ésta; tanto más se moverá la válvula. En la figura 7.11 se indica esta reacción y la componente proporcional. El factor a señalar en la acción derivada es que al oponerse ésta a todas las variaciones, posee un

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

gran efecto de estabilización, si bien no elimina el offset característico del sistema de posición proporcional.



Por este motivo la regulación derivada, suele emplearse conjuntamente con la integral. En la figura 7.12 puede verse un controlador proporcional + derivado (PD) típico. Ante un error ε entre la variable y el punto de consigna, la realimentación del fuelle proporcional da lugar a un desplazamiento a nivel de la tobera de:



$$y = K_r \Delta P'_o \quad \text{con } y = K\varepsilon$$

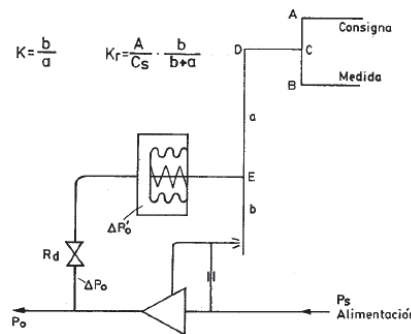
Luego: $\Delta P'_o = \frac{K}{K_r} \varepsilon = g\varepsilon$

Análogamente a lo estudiado en la acción integral, el fuelle proporcional se caracterizará por su capacidad y su resistencia R_d que dan lugar a una constante de tiempo t_d tal que:

$$\Delta P_o = \Delta P'_o + t_d \frac{d(\Delta P'_o)}{dt} \quad \text{y sustituyendo valores: } \Delta P_o = g\varepsilon + gt_d \frac{d\varepsilon}{dt}$$

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Examinando las figuras 7.13 y 7.14 se hace evidente el comportamiento del controlador. Por ejemplo, si en el tiempo t_0 la variable aumenta uniformemente siguiendo la forma de una rampa, el error variará a la velocidad constante $\frac{d\varepsilon}{dt}$ y producirá una variación positiva en la presión de salida del amplificador $\frac{dP_o}{dt}$.



De este modo, la presión diferencial instantánea a través de la restricción R_d será:

$$P_o - P'_o = \frac{dP_o}{dt} = K_t K_a K \frac{d\varepsilon}{dt} = \text{constante} \times \frac{d\varepsilon}{dt}$$

con K , K_t , K_a los factores de amplificación de consigna-medida a nivel de la tobera, transductor tobera-obturador y relé piloto o amplificador respectivamente. A medida que va pasando aire a través de la restricción R_d , P'_o aumenta con el mismo grado de variación de P_o . Para definir la acción derivada se considera el “tiempo de acción derivada” t_d como el intervalo en que la parte de variación de la presión de salida debida a la acción proporcional equivale a la parte de variación de presión debida a la acción derivativa cuando se aplica al instrumento **PD** una entrada en rampa.

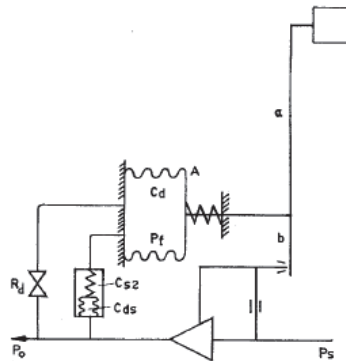
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.7.3.7 Control proporcional + integral + derivado.

(45) “Un controlador PID neumático dispone de dos fuelles (proporcional de realimentación negativa e integral con realimentación positiva) y dos restricciones (integral y derivada). En el controlador PID de la figura 7.13, denominado simétrico, llamemos d e i los desplazamientos a nivel de la tobera de los fuelles de la derecha con realimentación positiva (integral) y de la izquierda con realimentación negativa (proporcional) de la figura”.

$$\begin{aligned} \Delta P_0 &= \frac{K}{K_r} \frac{\tau_1 + \tau_d}{\tau_1 - \tau_d} \left[\varepsilon + \frac{1}{\tau_1 + \tau_d} \int \varepsilon dt + \frac{\tau_1 \tau_d}{\tau_1 + \tau_d} \frac{d\varepsilon}{dt} \right] = \\ &= g \left(\varepsilon + \frac{1}{\tau_1} \int \varepsilon dt + \tau_d \frac{d\varepsilon}{dt} \right) \text{ con} \end{aligned}$$

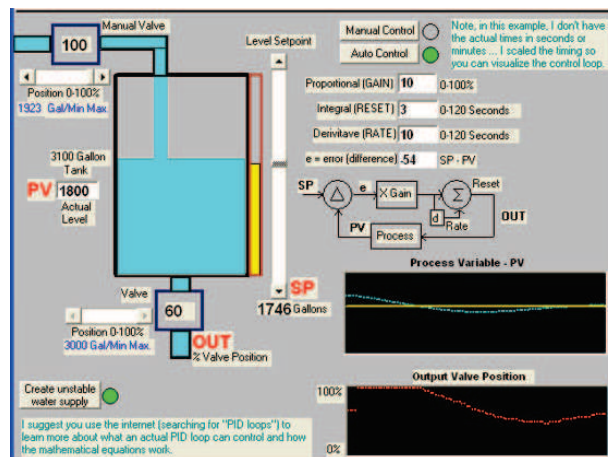
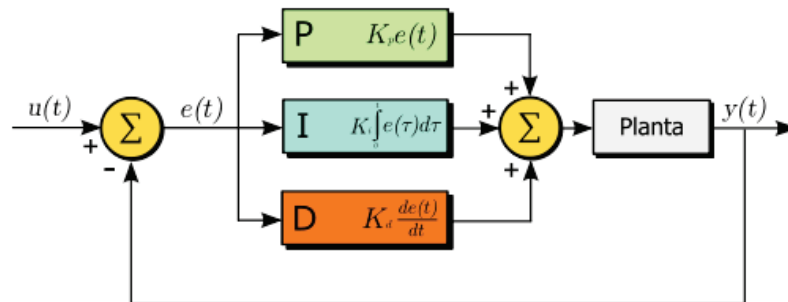
$$g = \frac{K}{K_r} \frac{\tau_1 + \tau_d}{\tau_1 - \tau_d} \quad \tau_1 = \tau_1 + \tau_d \quad \tau_d = \frac{\tau_1 \tau_d}{\tau_1 + \tau_d}$$



Como expresiones de la ganancia, tiempo de acción integral y tiempo de acción derivada de un controlador ideal equivalente. Se ve claramente que en el controlador PID simétrico existe interacción entre los ajustes de las acciones PID, es decir, que un cambio

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

en el ajuste de una acción influirá en las otras siendo, pues, relativamente laborioso conseguir un ajuste óptimo para que el controlador ante una perturbación lleve rápidamente y con el mínimo de oscilaciones la variable controlada a su punto de consigna.



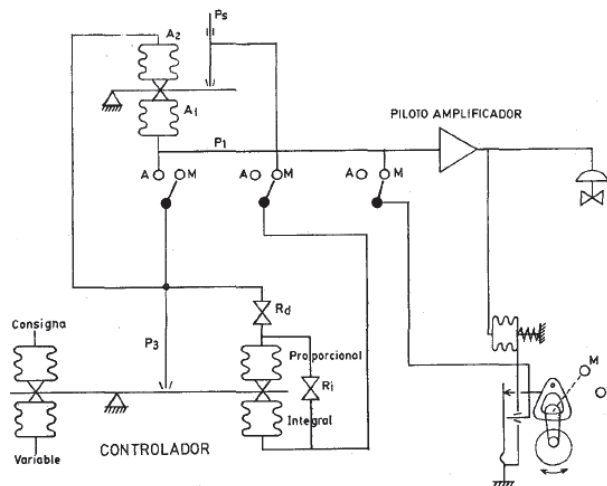
En electrónica sí es posible construir un instrumento PID sin interacción entre las bandas. Como es lógico, los instrumentos PID estudiados incorporan usualmente una banda derivada modificada para evitar saltos en la señal de salida antes un cambio brusco en el error.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.7.3.8 Cambio automático - manual – automático.

Es evidente que los controladores deben disponer de un accesorio que permita a voluntad del operador actuar manualmente sobre la válvula de control desde el propio panel de proceso. Esta necesidad es básica en la puesta en marcha del proceso.

En los controladores neumáticos, este accesorio es un pequeño manorreductor que en la posición “manual” desconecta previamente el propio controlador y acciona manualmente la válvula desde el propio instrumento. En “automático”, el manorreductor queda desconectado y la señal de salida del controlador pasa directamente a la válvula de control. Como es lógico, debe ser posible efectuar fácilmente el cambio tanto de automático a manual como de manual a automático. El cambio debe efectuarse de tal modo que la señal a la válvula antes y después no sufra variaciones, para evitar la variación de posición brusca de la válvula que se produciría y que podría repercutir desfavorablemente en el control del proceso.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

El cambio puede efectuarse sin tomar ningún cuidado, pasando directamente de manual a automático y viceversa sin que la válvula cambie de posición. Estos sistemas se basan en el seguimiento automático de los puntos de consigna y de la señal manual a la válvula. En la figura 7.13 puede verse un instrumento cuyo funcionamiento es el siguiente:

Cambio automático-manual. La unidad de control manual actúa como un transmisor de la posición de la rueda manual, con la salida de la tobera preparada para conectar a la entrada del piloto amplificador y con el fuelle de realimentación conectado permanentemente a la señal de salida a válvula. De este modo, al pasar de automático a manual, la señal de salida de la unidad de control manual se aplicará al relé amplificador y dará una señal a la válvula igual a la última señal existente en automático.

Cambio manual-automático. La presión posterior de la tobera de la unidad manual se aplica al fuelle A_1 de la unidad de equilibrio. El conjunto tobera-obturador de esta unidad comunica su presión posterior al fuelle integral de la unidad controladora, cuya tobera está conectada al fuelle A_2 de la unidad de equilibrio. De este modo, el sistema se equilibra continuamente manteniendo la igualdad $P_1 = P_3$ y en cualquier momento puede pasarse directamente a automático.

6.7.3.9 Tendencias en los instrumentos neumáticos.

Los instrumentos neumáticos de control de panel pueden ser del tipo convencional o del tipo miniatura. Estos instrumentos están actualmente muy perfeccionados y puede afirmarse que casi han llegado a su desarrollo límite. Dotados de bloques de control de técnica fluidica modulares, disponen de acción PID, control en cascada, alarmas de

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

desviación, relés de relación, interruptor para procesos discontinuos, conmutador automático-manual, etc. Son extraíbles de su caja de alojamiento por lo que, en caso de avería, su sustitución es inmediata. Existen instrumentos auxiliares, situados generalmente detrás del panel de control, que transforman o relacionan entre sí las variables medias. Típicamente son los extractores de raíz cuadrada, aparatos linealizadores de la señal, relés sumadores, relés multiplicadores y divisores, relés inversores, relés de alarma, integradores, etc.

Los controladores neumáticos pueden instalarse directamente en áreas peligrosas, y se mantienen funcionando aunque falle la alimentación eléctrica, mientras exista aire en las tuberías de alimentación neumática de la planta. Deben alimentarse a través de un filtro manorreductor y a la presión de 1.4 bar (o 20 psi). El aire de alimentación debe ser limpio, si es posible sin aceite, suministrado por compresores con aros de grafito que no precisan de lubricación. Su empleo ha ido disminuyendo debido a que carecen de las ventajas de tratamiento de las señales y de la información que poseen los sistemas digitales.

6.7.4 Sistemas de control electrónicos y digitales.

6.7.4.1 Generalidades.

Los circuitos electrónicos actuales utilizados para obtener los diversos tipos de control hacen un uso amplio del amplificador operacional. Las posibilidades de montaje que ofrece este tipo de amplificador son muy amplias debido a sus características particulares. Es usualmente un amplificador de corriente continua (c.c.) con una ganancia

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

en tensión en bucle abierto normalmente superior a 50000, que, mediante la conexión de componentes adecuados dispuestos en forma de realimentación positiva o negativa, constituye el “corazón” de los controladores electrónicos. Las características más importantes del amplificador operación el pueden resumirse en:

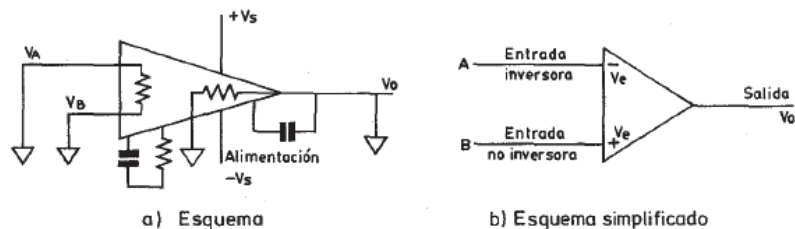
- Ganancia de tensión en c.c. elevada entre 10^3 a 10^6 relación entre una variación en la tensión de salida y la variación correspondiente en la entrada diferencial de tensión.
- Corriente de deriva en la entrada 1 nA a 100 μ A corriente que fluye a través de cualquier terminal de entrada mientras la tensión de salida es nula, expresada como promedio de las dos corrientes de entrada.
- Impedancia de entrada elevada, de 10 k Ω a 1000 M Ω .
- Bajo consumo, la corriente de alimentación varía entre 0.05 a 25 mA.
- Tensión de entrada en desfase entre 0.5 a 5 mV tensión en c.c. diferencial entre los dos terminales de entrada para que sea nula la tensión de salida.
- Corriente de entrada en desfase entre 1 nA a 10 μ A diferencia entre las dos corrientes de entrada.
- Tensión máxima de salida de 1 a 5 V, menor que los límites de la tensión de alimentación.
- Corriente de salida de 1 - 30 mA.

La mayor parte de los amplificadores operacionales son amplificadores diferenciales que, en esencia disponen de tres terminales, dos en la entrada y uno en la salida. Una señal de

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

entrada aplicada al terminal denominado “no inversor” hará que la salida cambie en la misma dirección: el símbolo aplicado es $+V_e$. Una variación de señal en la otra entrada hará que la señal de salida cambie en dirección inversa. Este segundo terminal se denomina “inversor” y se representa por el símbolo $-V_e$.

En la figura 7.14 puede verse un esquema de estas conexiones así como el símbolo empleado en los circuitos electrónicos.



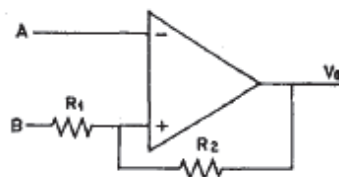
Se observará que las conexiones externas son dos alimentaciones $+V_s$ y $-V_s$ y dos componentes de compensación de frecuencia cuya misión es estabilizar el amplificador. Las conexiones internas equivalen a una impedancia de entrada muy grande Z_i definida como la relación entre la variación de tensión entre las dos entradas y la variación correspondiente de la corriente de entrada, y a una impedancia de salida Z_o equivalente a la relación entre la variación de la tensión de salida y la variación de la corriente de salida correspondiente. En el resto del texto se utilizará el símbolo resumido del amplificador suponiéndose que al mismo están conectados los componentes de alimentación y de compensación de frecuencia, a menos que se indique de otro modo.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.7.4.2 Control todo-nada.

(46) “El amplificador operacional puede utilizarse como un controlador todo-nada muy sensible gracias a la alta ganancia del amplificador. Bastará una pequeña diferencia de señales en la entrada para que se obtenga una salida total en voltios ligeramente inferior a la tensión de alimentación. Como señal de entrada se utiliza la diferencia entre la variable y el punto de consigna; y en el terminal de salida se conecta un circuito de excitación del relé final de control. La zona muerta del control todo-nada se logra mediante una resistencia conectada en serie con el terminal no inversor del amplificador y con una resistencia conectada entre este último terminal y el de salida del amplificador.

En la figura 7.15 puede verse un montaje de este tipo.



Su funcionamiento es el siguiente:

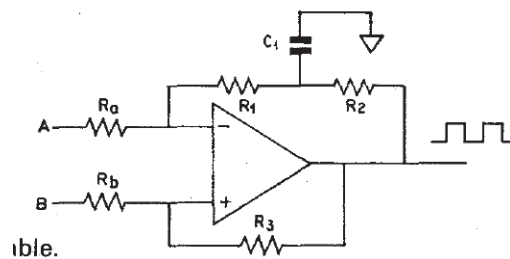
Cuando la señal en el terminal B aumenta unos pocos milivoltios con relación a la del terminal A, la salida V_0 aumenta y es realimentada vía la resistencia R_2 a la entrada del amplificador bloqueando éste. El amplificador permanece en estas condiciones gracias al divisor de tensión que forman los terminales B y la salida”. Para que las condiciones iniciales se restablezcan, la señal de entrada debe bajar los suficientes milivoltios, con relación al terminal inversor, para compensar el efecto del divisor de tensión R_1R_2 . El

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

valor de la zona muerta depende de la relación R_2/R_1 y será tanto más pequeña cuanto mayor sea esta relación.

6.7.4.3 Control proporcional de tiempo variable.

El control todo-nada descrito anteriormente puede modificarse ligeramente para obtener un control proporcional de tiempo variable. En la figura 7.16 puede verse el esquema correspondiente que deriva del todo-nada aplicando un circuito RC entre la salida y la entrada inversora, para conseguir de este modo un retardo en la realimentación inversora y hacer que el circuito entre en oscilación. El circuito funciona del modo que a continuación se detalla:



Sea la tensión en A nula y la tensión en B negativa con respecto a el A. Evidentemente, la señal de salida será negativa, con lo cual el condensador C_1 se cargará negativamente y el divisor de tensión $R_a R_1 R_2$ impedirá que el terminal inversor del amplificador operacional tenga menor tensión negativa que la entrada no inversora. Si ahora la entrada B se hace positiva con relación a el de A, la señal de salida se hará positiva, cargando también positivamente el condensador C_1 en un tiempo que depende de los valores de R_2 y C_1 . En el instante en que la carga positiva de C_1 es suficiente para compensar el divisor

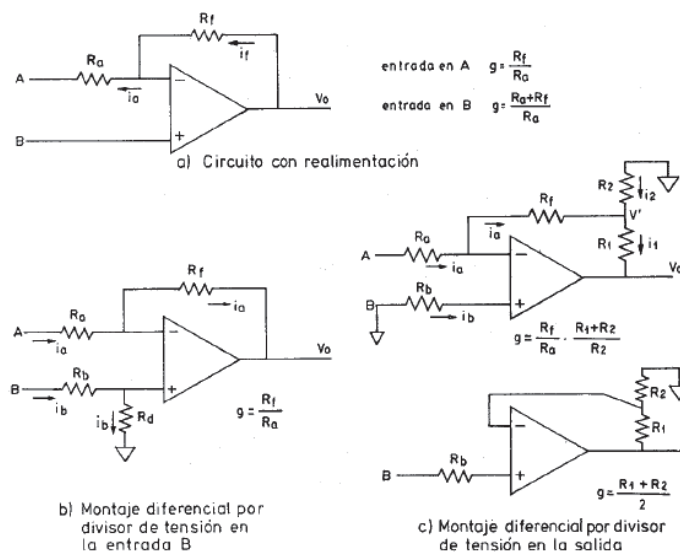
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

de tensión formado por $R_a R_1$ la entrada inversora se hace positiva, provocando el cambio de signo en la señal de salida, pasando ésta a negativa.

A continuación, la carga del condensador se hace negativa y va aumentando hasta que sobrepasa la influencia del divisor de tensión $R_a R_1$ con lo cual la entrada inversora se hará negativa y por lo tanto la señal de salida cambiará ahora a positiva, y así sucesivamente. Estas oscilaciones en la salida tienen la forma de onda cuadrada, de amplitud casi equivalente a la tensión de alimentación.

6.7.4.4 Control proporcional.

Si el amplificador operacional se usa como amplificador analógico de ganancia finita, su alta ganancia da lugar a que la entrada tenga que ser muy débil, casi nula, del orden de 0.2 mV. Para disminuir esta elevada ganancia es necesario realimentar la señal de salida a la entrada inversora $-V_e$ mediante una resistencia R_f , y como nos interesará que la señal de entrada tenga un valor distinto de cero, se añade al circuito otra resistencia R_a . En la figura 7.17 a puede verse el nuevo esquema de conexionado.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Consideremos ahora que las señales de entrada y salida sean nulas; evidentemente no habrá circulación de corriente a través de las resistencias R_f y R_a . Si ahora la entrada inversora A cambia a + 1 V, la tensión de salida variará en la dirección $-V_e$ hasta que la corriente de entrada del amplificador se reduzca a cero (ya que es un amplificador diferencial). Esta condición se alcanza cuando:

$$\frac{V_0 \text{ (salida)}}{R_f} = \frac{V_a \text{ (entrada)}}{R_a}$$

De aquí, la ganancia del amplificador = $\frac{V_0}{V_A} = \frac{R_f}{R_a}$

Si en lugar de variar la señal de entrada inversora A, es la entrada no inversora B la que cambia únicamente en + 1V, la señal de salida variará positivamente en la dirección $+V_e$ hasta que la realimentación $-V_e$, a través de la resistencia R_f , aumente la señal en la entrada inversora el mismo valor que la entrada no inversora B. En estas condiciones, la ganancia del amplificador es:

$$\text{Ganancia} = \frac{V_0}{V_B} = \frac{R_a + R_f}{R_a}$$

Esta diferencia de ganancias, aunque no sea muy acusada debido a las características particulares del amplificador, debe eliminarse en las aplicaciones verdaderamente diferenciales.

6.7.4.5 Control integral.

La acción integral puede generarse en el amplificador operacional mediante un condensador conectado en serie con la línea de realimentación negativa y con una

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

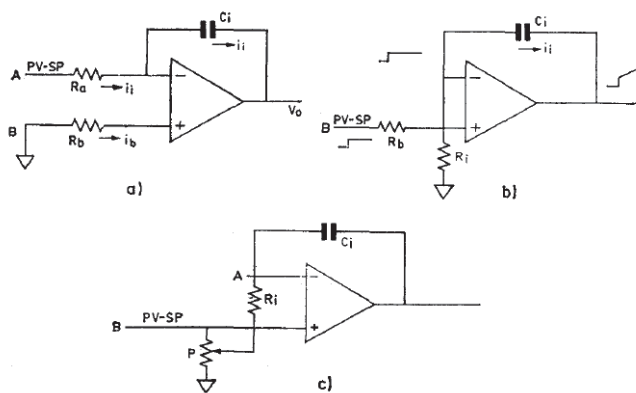
resistencia conectada en serie con el terminal inversor, según puede verse en la figura 7.19 a. Siendo i_b una intensidad débil comparada con la intensidad de corriente i_i se verificarán las ecuaciones siguientes:

$$V_0 = \frac{-\int i_i dt}{C_i} \qquad PV - SP = i_i R_a$$

De donde:

$$V_0 = -\frac{1}{R_a C_i} \int_0^t (PV - SP) dt$$

Que es la ecuación de la acción integral con constante de tiempo $\tau_i = R_a C_i$. El sistema de la figura 7.19 a tiene el inconveniente de invertir la señal de salida con relación a la señal de error (PV-SP), lo cual es indeseable en algunas aplicaciones.



Para evitarlo puede conectarse la señal de error a la entrada no inversora, dejando el condensador de integral entre la salida y la entrada inversora y conectando esta última a la línea de cero voltios a través de una resistencia (figura 7.19 b). Cuando se aplica una señal de error positiva PV -SP a la entrada no inversora B, la salida cambia en una dirección positiva, con lo cual el condensador C_i se va cargando, pasando así una

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

corriente i a través de la resistencia R_i lo que provoca una variación de la carga del condensador. La disminución de tensión correspondiente creada en la entrada inversora del amplificador hace que la salida aumente en una dirección positiva, lo cual a su vez hace que el terminal negativo, a través del condensador C , pase a tener una tensión positiva, manteniendo la corriente i_i en la resistencia R_i y continuando indefinidamente esta cadena de acontecimientos, acción que recibe el nombre de integración.

Para un error PV-SP positivo, la señal de salida cambia en forma de rampa positiva. La velocidad de variación de la salida depende de los valores de C_i y R_i así como del valor de la señal de error. La señal de error vista por el amplificador operacional, puede variarse conectando la resistencia R_i al cursor de un potenciómetro conectado entre la entrada B de la señal de error y la línea de 0 voltios. De este modo se obtendrá un ajuste fino del tiempo de acción integral en el potenciómetro, y un ajuste más amplio cambiando los valores de la resistencia R_i . En la figura 7.19c puede verse el esquema correspondiente.

6.7.4.6 Control derivativo.

La acción derivativa puede conseguirse colocando un condensador C_d a la entrada inversora y una resistencia R_d en paralelo entre la salida y la entrada inversora. En la figura 9.32 a puede verse el esquema correspondiente.

Las ecuaciones correspondientes son:

$$V_0 = -i_d R_d \qquad PV - SP = \frac{\int i_d dt}{C_d}$$

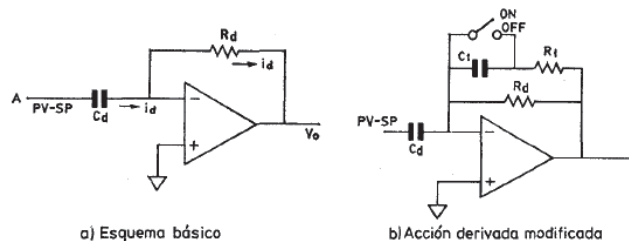
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Derivando la segunda ecuación resulta: $\frac{d(PV-Sp)}{dt} = \frac{1}{C_d} i_d$

Y sustituyendo en la primera se tiene:

$$V_o = -R_d C_d \frac{d(PV - Sp)}{dt}$$

Qué es la ecuación de acción derivativa de una constante de tiempo $\tau_d = R_d C_d$. El ajuste de la acción derivativa se obtiene transformando la resistencia R_d en un potenciómetro. Cuando la señal de error cambia rápidamente (debido a una variación rápida del punto de consigna o bien de la variable o quizá provocado por señales con ruido) la señal de salida aumenta muy rápidamente tomando en el límite la forma de un pico. Este efecto es indeseable ya que puede perjudicar el control del proceso. Se soluciona este inconveniente eliminando la acción derivativa cuando el instrumento capta una variación rápida de la señal de error. Se conecta un condensador C_1 y una resistencia R_1 en serie, en paralelo con la resistencia derivativa R_d (figura 7.20 b).



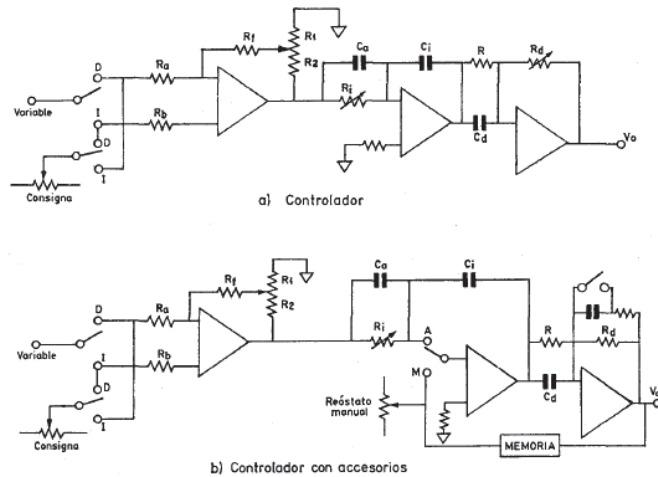
De este modo, como la impedancia de C_1 es inversamente proporcional a la variación de tensión que se le aplica, un cambio rápido de tensión hará que el condensador C_1 presente una baja impedancia a través de la resistencia derivativa R_d , con lo cual el tiempo de acción derivativa será necesariamente bajo, modificándose el valor derivativo

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

ajustado, pero sólo durante el instante de la variación rápida de la señal de error. Un interruptor conectado en paralelo con el condensador C_1 permite, en la posición de conexión, eliminar la acción derivativa cuando así se desee.

6.7.4.7 Control proporcional + integral + derivativo (PID)

La unión en un circuito de los tres controladores descritos anteriormente da lugar a un instrumento electrónico proporcional + integral + derivativo.



El circuito simplificado consiste en un módulo proporcional + integral donde se fija la ganancia o banda proporcional, se amplifica la desviación entre la variable y el punto de consigna, se fija el valor del punto de consigna y se selecciona la acción directa o la inversa del controlador y un módulo de acción derivada modificada donde se encuentra el potenciómetro de acción derivada. En la figura 7.21 a puede verse un esquema simplificado del controlador. La ecuación correspondiente es:

$$V_0 = g(PV - SP) + K \int_0^t (PV - SP) dt + K'' \frac{d(PV - SP)}{dt}$$

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

En otros controladores, el potenciómetro de acción proporcional se encuentra en la salida del segundo amplificador operacional. Los controladores electrónicos suelen disponer además de un conmutador automático-manual con un reóstato para control manual y un circuito de memoria para que el cambio automático a manual se efectúe sin saltos. Estos accesorios se representan en la figura 7.21 b.

6.7.4.8 Cambio automático - manual – automático.

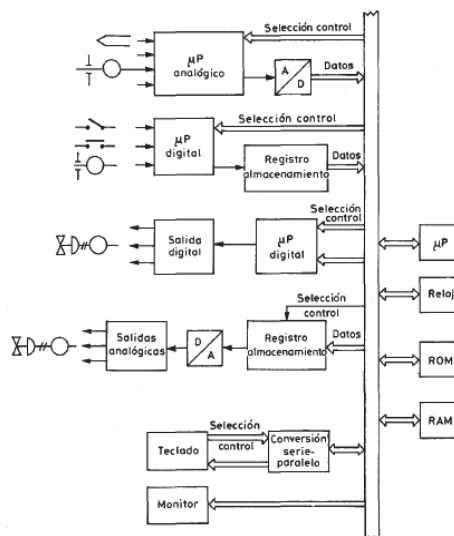
En los instrumentos electrónicos, el cambio manual-automático o automático-manual se efectúa sin saltos en la posición de la válvula de control gracias a un circuito de “memoria” que mantiene el mismo nivel de potencial antes de la conmutación. En la posición “manual” el elemento final de control recibe la salida de un potenciómetro de ajuste manual, mientras que en la posición “automática” la conexión queda establecida en el bloque PID (figura 7.21 b).

6.7.4.9 Controladores digitales.

Los instrumentos electrónicos de control de panel descritos son del tipo miniatura. Dotados de las mismas funciones que el controlador neumático anterior, pueden contener un microprocesador, lo que les ha permitido la incorporación de “inteligencia” para permitir, por ejemplo, el ajuste del punto de consigna y de las acciones PID sin extraer el instrumento de su base en el panel, el autoajuste del instrumento (fijación de los valores de las acciones proporcional, integral y derivada) para acomodarse a las variaciones de régimen de carga del proceso, y el autodiagnóstico del aparato.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

El **controlador digital** contiene el procesador o microprocesador (o CPU Central Process Unit) y la memoria principal, comunicados entre sí y con los periféricos (teclado, monitor, unidad de discos, ratón, impresora, plotter y modem), a través de tres conductos o canales de señales o buses: el bus de datos, el bus de direcciones y el bus de control. En la figura 7.22 puede verse el esquema general de un controlador digital.



Para representar valores más altos que el byte pueden asociarse dos bytes formando lo que se denomina palabra (word). Fundamentalmente hay dos tipos de memoria:

ROM (Read Only Memory) o memoria de solo lectura, que no puede ser modificada y no se borra al desconectar el ordenador, donde se guarda el sistema operativo que proporciona la interfaz entre el ordenador y el exterior (le dice al ordenador lo que tiene que hacer). Existen varios sistemas operativos: MS-DOS, PC-DOS, CP/M-86, CCP/M, UCSD-P, PICK, UNIX y otros.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

RAM (Random Access Memory) o memoria de acceso aleatorio que almacena los programas. Estos programas constituyen una especie de “memoria Aprendida” o software, mientras que la estructura física del ordenador que soporta la información recibe el nombre de hardware y es “todo lo que puede verse y tocarse” incluyéndose los periféricos. La RAM es “volátil” es decir, se borra al desconectar el ordenador.

Para almacenar permanentemente los datos procesados por el ordenador, se utilizan las unidades de discos incorporadas al ordenador (duros) y las externas. Existen controladores digitales individuales, en particular para procesos discontinuos (batch), que llevan a cabo un control multifunción, actúan como instrumentos reguladores (para variables como la presión, el caudal, el nivel, la temperatura, ...), con control lógico y control secuencial, efectúan operaciones aritméticas, monitorizan entradas y salidas, y tienen capacidad gráfica con representación del balance de materias.

Por este motivo pueden trabajar con varios algoritmos de control P + I + D. El algoritmo convencional, donde las acciones se influyen mutuamente, y que corresponde a los controladores clásicos neumáticos y electrónicos, es:

$$DEF FNV (p) = K \left(1 + \frac{1}{TI p} \right) \cdot \left(\frac{1 + TD p}{1 + Ta p} \right) e$$

p = Operador $\frac{d}{dt}$ (si fuera la letra s indicaría la variable correspondiente en el dominio de Laplace).

e = Error o diferencia entre la variable y el punto de consigna.

K = Ganancia del controlador (100/banda proporcional).

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

TI = Tiempo de acción integral en minutos/repetición.

TD = Tiempo de acción derivativa en minutos de anticipo.

Los controladores digitales, por su propia constitución, son configurables a través del teclado, pudiendo realizarse en general, las siguientes selecciones:

- Filtrado digital de la señal de entrada.
- Presentación de la variable en unidades seleccionables (por ejemplo, m³/h, °C, etc.).
- Selección del tipo de control todo - nada. P, PI, PD, PID y de otros algoritmos.
- Selección de acción directa (al aumentar la variable aumenta la señal de salida) o acción inversa (al aumentar la variable disminuye la señal de salida).
- Límite en la acumulación de la acción integral en procesos discontinuos.
- Corrección de emisividad en la medición de temperatura por pirómetro de radiación.
- Seguimiento del punto de consigna.
- Autoajuste de las acciones de control.
- Seguridad contra manejo no autorizado.
- Autodiagnóstico.

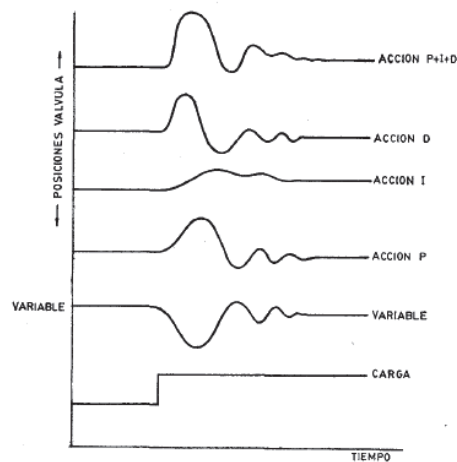
Existen controladores digitales individuales, en particular para procesos discontinuos (batch), que llevan a cabo un control multifunción, actúan como instrumentos reguladores (para variables como la presión, el caudal, el nivel, la temperatura, etc.), con control lógico y control secuencial, efectúan operaciones aritméticas, monitorizan

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

entradas y salidas, y tienen capacidad gráfica con representación del balance de materias. Este tipo de controladores permite incluso la creación de software para definir todos los enclavamientos y secuencias de la operación. Los controladores digitales forman también parte del control distribuido, del cual se habla más adelante, en el que uno o varios microprocesadores controlan las variables que están repartidas por la planta, conectados, por un lado, a las señales de los transmisores de las variables y, por el otro, a las válvulas de control.

6.7.5 Selección del sistema de control.

Las tres acciones combinadas PID actúan sobre el elemento final de control en la forma señalada en la figura 7.23.



Sus características esenciales ya explicadas pueden resumirse así:

1. La acción proporcional cambia la posición de la válvula proporcionalmente a la desviación de la variable con respecto al punto de consigna.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

2. La acción integral mueve la válvula a una velocidad proporcional a la desviación con respecto al punto de consigna.
3. La acción derivada corrige la posición de la válvula proporcionalmente a la velocidad de cambio de la variable controlada.

Considerando estos puntos, la selección del sistema de control es usualmente un compromiso entre la calidad del control que se desea y el coste del sistema de control. Es decir, debe ser suficiente para satisfacer la tolerancia requerida en el proceso, pero no debe incluir excesivos refinamientos que lo encarezcan. Sin embargo, económicamente hay muy poca diferencia entre un controlador PI y uno PID, de modo que en el caso de estudiar procesos y sus perturbaciones que no sean bien conocidos puede ser más barato adquirir el controlador PID para tener así un potencial de mayor flexibilidad en el control del proceso. No obstante, los instrumentos actuales de tipo modular admiten fácilmente la adición de una o más acciones.

Control	Proceso		Cambios de carga	Aplicaciones
	Capacitancia	Resistencia		
Todo - nada	Grande	Cualquiera	Cualquiera	Control de nivel y temperatura en procesos de gran capacidad.
Flotante	Media			Procesos con pequeños tiempos de retardo.
Proporcional	Pequeña a Media	Pequeña	Moderados	Presión, temperatura y nivel donde el offset no es

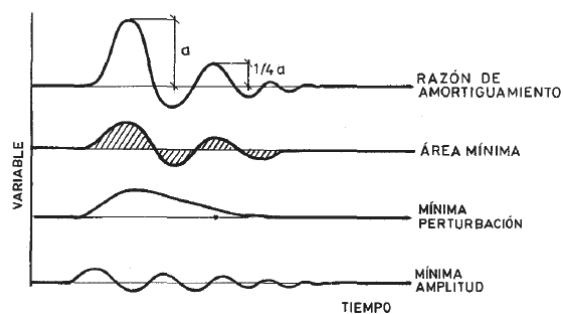
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

				inconveniente.
Proporcional + integral	Cualquiera		Cualquiera	La mayor parte de aplicaciones, incluyendo el caudal
Proporcional + derivada	Media			Cuando es necesario una gran estabilidad con un offset mínimo y sin necesidad de acción integral.
Proporcional + integral + Derivada	Cualquiera	Grande	Rápido	Procesos con cambios rápidos y retardos apreciables (control de temperatura en intercambiador de calor).

Los controladores digitales incorporan las tres acciones, de modo que la elección de las mismas es técnica, para que el proceso esté bien controlado y no económica.

6.7.6 Criterios de estabilidad en el control.

La estabilidad del control es la característica del sistema que hace que la variable vuelva al punto de consigna después de una perturbación.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Los criterios deseables para la estabilidad se representan en la figura 7.24 y son los siguientes:

Criterio de razón de amortiguamiento. La amortiguación de la respuesta es tal que la relación de amplitudes entre las crestas de los dos primeros ciclos sucesivos es 0.25, es decir, que cada onda equivale a una cuarta parte de la anterior. Este criterio es un compromiso entre la estabilidad de la respuesta del controlador y la rapidez del retorno de la variable a un valor estable: una relación mayor que $1/4$ dará mayor estabilidad pero prolongará el tiempo de normalización de la variable, mientras que una relación menor que $1/4$ devolverá la variable más rápidamente al punto de consigna o a un valor estable, pero perjudicará la estabilidad del sistema

Criterio de área mínima. Este criterio indica que el área de la curva de recuperación debe ser mínima, para lograr que la desviación sea mínima en el tiempo más corto.

Criterio de mínima perturbación. Éste requiere una curva de recuperaciones no cíclicas, y se aplica cuando por ejemplo, las correcciones rápidas o cíclicas de una válvula de control de vapor, pueden perturbar seriamente las presiones de vapor de alimentación e influir en otros procesos alimentados por la misma fuente. Otro caso puede ser el control en cascada en que la señal de salida de un controlador varíe cíclicamente y se aplique como punto de consigna en un segundo controlador creándole serias variaciones de carga.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.7.7 Métodos de ajuste de controladores.

Existen varios sistemas para ajustar los controladores al proceso, es decir, para que la banda proporcional (ganancia), el tiempo de acción integral (minutos/repetición) y el tiempo de acción derivada (minutos de anticipo) del controlador, caso de que posea las tres acciones, se acoplen adecuadamente con el resto de los elementos del bucle de control - proceso + transmisor + válvula de control. Este acoplamiento debe ser tal que, ante una perturbación, se obtenga una curva de recuperación que satisfaga cualquiera de los criterios mencionados para que el control sea estable, en particular, el de área mínima con una relación de amortiguación de 0.25 entre crestas sucesivas de la onda. Para que este acoplamiento entre el controlador y el proceso sea posible es necesario un conocimiento inicial de las características estáticas y dinámicas del sistema controlado. Existen dos métodos fundamentales para determinar estas características, el método analítico y el experimental. El método analítico se basa en determinar el modelo o ecuación relativa a la dinámica del sistema, es decir, su evolución en función del tiempo. Este método es generalmente difícil de aplicar por la complejidad de los procesos industriales y se incorpora a los controladores digitales y al control distribuido, que disponen de la potencia de cálculo adecuada en la determinación de la identificación del proceso y de los parámetros del modelo. En el método experimental, las características estáticas y dinámicas del proceso se obtienen a partir de una medida o de una serie de medidas realizadas en el proceso real. Estas respuestas del proceso pueden efectuarse de tres formas principales.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

1. Método de tanteo (lazo cerrado).
2. Método de ganancia límite (lazo cerrado).
3. Método de curva de reacción (lazo abierto).

6.7.8 Otros tipos de control.

Generalidades

Se han visto ahora sistemas de regulación basados en la realimentación continua de la señal de error del proceso a través del controlador, consiguiéndose gracias a las características de estabilidad del lazo cerrado de control la reducción gradual del error hasta que éste se anula apreciablemente dentro de los límites de precisión de los instrumentos (o se estabiliza si sólo existe acción proporcional y hay offset).

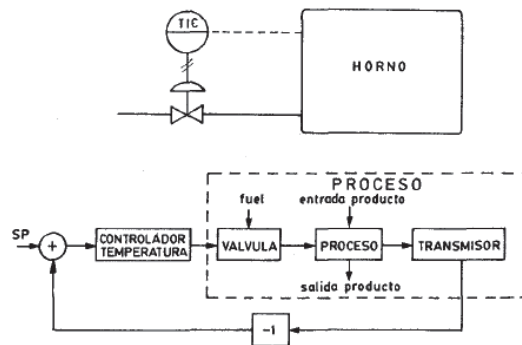
Una gran ventaja del sistema de realimentación es que no es necesario un conocimiento completo de las características del proceso, ya que el control se inicia al presentarse una señal de error y el controlador realiza la corrección de forma externa al proceso. De aquí que se ha generalizado la aplicación de otras técnicas de control que son variantes o completan las **P**, **PI** o **PID** estudiadas o bien constituyen otro enfoque completamente distinto del clásico.

6.7.8.1 Control en cascada.

Una de las técnicas para mejorar la estabilidad de un circuito complejo es el empleo del control en cascada. Su utilización es conveniente cuando la variable controlada no puede mantenerse dentro del punto de consigna, por óptimos que sean los ajustes del

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

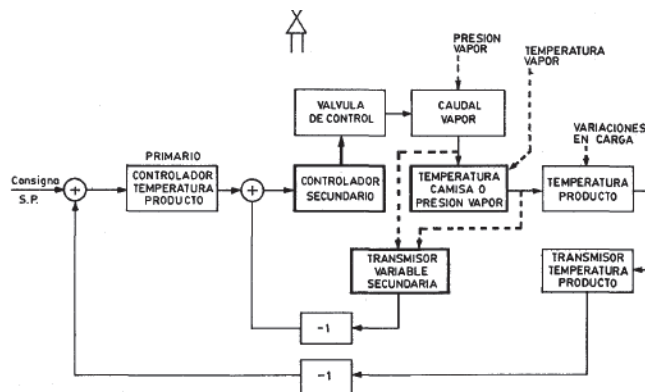
controlador, debido a las perturbaciones que se producen en alguna condición del proceso.



Cuando la temperatura medida se desvía del punto de consigna, el controlador varía la posición de la válvula de fuel, y si todas las características del combustible (presión, viscosidad) y del producto permanecen constantes, el control será generalmente bueno. Sin embargo, si una de las características, por ejemplo la presión, cambia de forma incontrolada, el caudal a través de la válvula seguirá la misma variación aunque su vástago permanezca fijo. Cambiará, pues, la temperatura y, al cabo de un cierto tiempo dependiente de las características de capacidad, resistencia y tiempo de transporte del proceso las variaciones de temperatura llegarán al controlador y éste reajustará la posición de la válvula de acuerdo con las acciones de que disponga. Será una casualidad que las correcciones del controlador eliminen totalmente las perturbaciones en la presión del fuel, ya que esas perturbaciones son totalmente al azar y hay un retardo entre las mismas y el envío de la señal de corrección del controlador a la válvula. Por lo tanto, las continuas perturbaciones en la presión, no sólo darán lugar a una corrección continua e

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

innecesaria en la válvula, sino que perjudicarán el logro de una buena regulación pudiendo incluso impedir totalmente el control del proceso.



Nótese que el control de temperatura se realiza mediante la aportación del calor cedido por el fuel que pasa a través de la válvula, es decir, la temperatura es regulada más bien por el caudal de fuel (si la calidad del fuel es constante) que por la posición del vástago de la válvula. Estos dos instrumentos conectados en serie actúan manteniendo la temperatura constante, el controlador de temperatura manda y el de caudal obedece. Esta disposición se denomina control en cascada, y puede verse en la figura 9.46 conjuntamente con su diagrama de bloques. Para que el control en cascada sea eficaz es necesario escoger adecuadamente la variable secundaria teniendo en cuenta las perturbaciones que pueden presentarse y las velocidades de respuesta de los distintos componentes del proceso. Para seleccionarla pueden seguirse los siguientes pasos:

1. Dibujar el diagrama de bloques del posible sistema en cascada.
2. El lazo secundario debe incluir la perturbación posible más importante.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

3. El lazo secundario debe ser de respuesta rápida y para ello debe incluir los retardos mínimos del sistema de control.
4. Los puntos de consigna de la variable secundaria deben estar relacionados directamente con los de la variable primaria y, a ser posible, su relación debe estar representada por una recta en preferencia a una línea curva. De este modo se simplificará el ajuste del controlador primario.
5. El lazo secundario debe contener el mayor número posible de perturbaciones mientras sea suficientemente rápido.
6. La variable secundaria seleccionada debe proporcionar una estabilidad al control secundario con la ganancia más alta que sea posible (BP más baja).

Estos pasos a seguir estarán naturalmente basados en el conocimiento del proceso a controlar y conviene que se apliquen con sentido común. Como ejemplo de los mismos puede verse en la figura 7. la aplicación del control en cascada al control de temperatura de un líquido en un tanque encamisado.

6.7.8.2 Programadores.

(47) “Numerosos procesos industriales que siguen una relación determinada de una variable con el tiempo, requieren un control automático para seguir y reproducir un programa fijo

Estos instrumentos se denominan programadores controladores y realizan tres funciones básicas”.

1. Control automático de la variable.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

2. Temporización (relés y contactos auxiliares y temporizadores para funciones adicionales).
3. Variación del punto de consigna del controlador (función de programación).

El programador se compone del generador del punto de consigna, que es el componente básico del sistema que determina la temporización y fija la marcha de la variable a lo largo del tiempo, y del controlador neumático, electrónico o digital con regulación todo/nada, proporcional, PI o PID, dotado de indicación o registro de la variable.

Existen tres métodos básicos para posicionar automáticamente el índice del punto de consigna de la variable de medida:

1. El índice está fijado mecánicamente a una leva movida por un motor síncrono (programador de levas).
2. El índice está acoplado directamente a uno o a varios motores síncronos (programador rectangular) con varios interruptores que limitan, arrancan o terminan el programa.
3. El índice forma parte de un controlador digital dedicado a ejecutar el control programado en tiempo de la variable de proceso.

En el programador de levas, el punto de consigna viene reposicionado automáticamente por una leva cortada de acuerdo con un programa de tiempo predeterminado. Detrás de la leva que suele ser de plástico transparente de modo que puede verse el gráfico a su través de una pluma conectada al sistema de medida del instrumento registra la variable medida.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Programadores rectangulares.

Estos instrumentos son de gráfico rectangular, equipados con motores síncronos que mueven el índice hacia arriba o hacia abajo y con varios interruptores que arrancan, controlan o terminan diferentes partes del programa. Existen temporizadores separados que controlan la duración de los tiempos de mantenimiento o cambio de la variable y controladores de velocidad que permiten ajustar las velocidades de subida o de bajada de la variable. Comparado con el programador de levas, éste es más versátil ya que permite cambiar fácilmente la duración de los períodos de mantenimiento (curvas BC-DE) ajustando sólo los temporizadores y variar la pendiente de la variable (curvas CD-EFG) ajustando el punto de consigna de los controladores de velocidad. En aplicaciones en que se requieran aumentos o disminuciones de la variable no lineales, pueden montarse controladores de velocidad adicionales que interrumpen periódicamente el circuito del motor a intervalos frecuentes de modo que el índice se mueva discontinuamente; las paradas del motor son tan pequeñas que prácticamente se obtiene una línea continua.

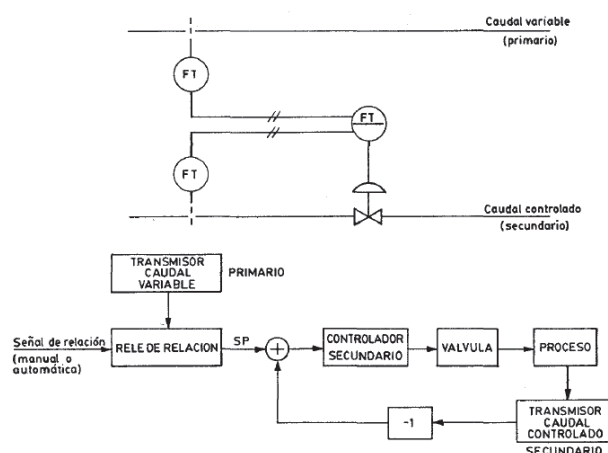
Un caso típico se presenta en el control de temperatura. Según el tipo de termopar empleado existen distintas desviaciones de la linealidad en todo el intervalo de medida. El seguimiento de estas curvas viene determinado por el número de controladores de velocidad requeridos, limitado por otro lado por el número de interruptores disponibles en el programador. Otra solución consiste en linealizar el margen fabricando especialmente el reóstato del circuito de medida potenciométrica, solución más cara pero a menudo la única satisfactoria.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Los programadores con microprocesador permiten la programación en rampa de forma fácil y repetitiva, totalmente configurable por teclado. El ordenador permite guardar un determinado número de programas (por ejemplo 20) que pueden llamarse cuando se desee con una salida por relé o analógica (4-20 mA c.c), pudiendo visualizarse en el monitor el programa seleccionado, y los resultados obtenidos en el proceso. El sistema es, pues, muy versátil e ideal en la programación de temperatura en procesos donde pueden fabricarse diversos productos en condiciones de servicio distintas, tal como en los reactores.

6.7.8.3 Control de relación.

El control de relación es un sistema de control en el que una variable de proceso es controlada con relación a otra variable. Mientras que el control en cascada es sólo un método que mejora la regulación de una variable, el control de relación satisface una necesidad específica, el control de la relación entre dos cantidades. Estas cantidades suelen ser caudales de fluidos, tal como puede verse en la figura 7.25.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

La señal del transmisor de caudal es multiplicada por un factor fijado manual o automáticamente. La señal de salida del multiplicador es el punto de consigna del controlador cuya señal de salida actúa directamente sobre la válvula de control.

Hay que señalar que el ajuste del relé de relación es función de los campos de medida relativos de los transmisores. Si en el ejemplo de la figura 7.25, el transmisor del caudal variable (sin controlar) tiene un campo de medida 1.5 veces mayor que el del transmisor del caudal controlado y se desea que el caudal controlado esté siempre en la proporción de 1:2 con relación al caudal variable, deberemos ajustar el dial del relé de relación en la

posición: $\frac{1}{2} \times \frac{1.5}{1} = 0.75$

Por otro lado, los campos de medida de los transmisores deben estar expresados en las mismas unidades, y es necesario considerar sus campos de control que influirán inevitablemente en la precisión de la relación entre las dos variables. En efecto, si los transmisores son cuadráticos con la “rangeability” 4:1 y hay que mantener una razón de 0.75 el controlador perderá su precisión cuando el caudal variable (primario) baja por debajo de 0.25 % de su campo de medida, lo que equivaldrá a que se pierda también la precisión si el caudal controlado (secundario) es inferior a 33% de su campo de medida, ya que el instrumento tiende a mantener su punto de consigna en

$$0.75 = \frac{\text{Caudal primario}}{\text{Caudal secundario}}$$

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

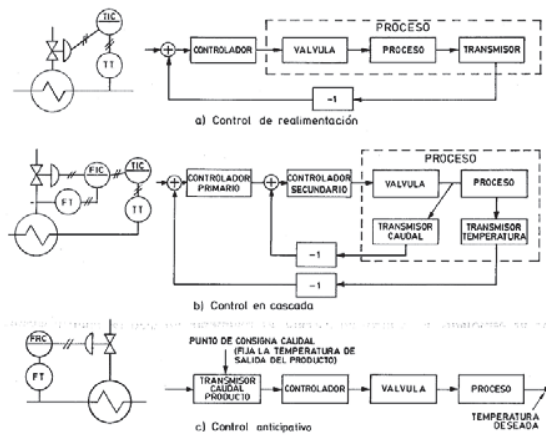
6.7.8.4 Control anticipativo.

El control de realimentación es la técnica más común empleada en el control de procesos. En este tipo de control la señal de salida (variable controlada) es comparada con un valor deseado (punto de consigna) y, la señal de error actúa sobre el controlador. En sistemas que poseen tiempos de retardo importantes con desviaciones de magnitud y duración distintas, la señal de error es detectada mucho tiempo después que se ha producido el cambio de carga, por lo cual, la corrección correspondiente es retardada y ocurre a veces que actúa cuando ya no es necesaria porque se ha eliminado el cambio de carga que dio lugar a la corrección. El control en cascada es realmente un lazo de control secundario dentro de otro primario, con una respuesta suficientemente rápida establecida considerando que la relación entre las constantes de tiempo del lazo primario al secundario sea de tres o mayor. Por lo tanto, aunque el control en cascada sea suficientemente rápido ante perturbaciones de la variable secundaria no deja de tener el inconveniente de necesitar que se produzca una desviación antes de actuar, con el peligro de que sólo responde rápidamente ante la variable secundaria sin que actúe del mismo modo ante variaciones en la variable primaria (por ejemplo el caudal o la temperatura del producto de entrada).

El **control anticipativo (feed forward)** parte de la medida de una o más variables de entrada y actúa simultáneamente sobre la variable manipulada que produce la salida

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

deseada del proceso. En la figura 7.26 puede verse una comparación entre controles de realimentación, en cascada y anticipativo aplicados a un típico intercambiador de calor.



Nótese que el control anticipativo requiere un conocimiento exacto y completo de las características estáticas y dinámicas del proceso, en particular la relación entre el caudal del producto y la temperatura de salida, la influencia que tienen las perturbaciones en la presión del vapor, en la temperatura del producto de entrada, en el rendimiento del intercambiador, etc. Es decir, la relación entre la temperatura de salida y el caudal de entrada constituye un modelo del proceso y es la función de transferencia del sistema de control anticipativo. Evidentemente, el controlador es quien debe responder con esta función, pero como es lógico, su eficacia depende de la precisión que se consiga en la medida de la variable o variables de entrada y de la precisión alcanzada en el modelo calculado del proceso. Por otra parte, hay que señalar que es costoso y a veces imposible determinar y duplicar el modelo exacto del proceso. Por lo tanto, siendo realmente un

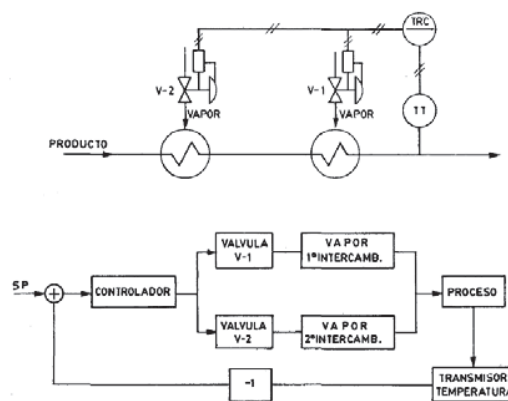
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

control en lazo abierto, su aplicación aislada dará lugar a un offset significativo, es decir, la temperatura de salida se apartará significativamente de la deseada.

En resumen, puede afirmarse que el control de realimentación puede controlar bien en régimen permanente, pero no lo hace satisfactoriamente en condiciones dinámicas de funcionamiento del proceso. En cambio, el control anticipativo es capaz de seguir rápidamente los cambios dinámicos, pero puede presentar un offset considerable en la variable de salida.

6.7.8.5 Control de gama partida.

El control de gama partida (split-range control) es una forma de control en el que una variable manipulada tiene preferencia con relación a otra u otras del proceso. En la figura 7.27 puede verse este tipo de control aplicado a dos intercambiadores de calor en serie.



La instalación se utiliza para calentar un producto cuyo caudal es muy variable; cuando es bajo basta un solo intercambiador para calentarlo y cuando la fabricación es la máxima son necesarios los dos. Suponemos que, desde el punto de vista de seguridad, las válvulas deben cerrar en caso de fallo de aire, por lo cual el controlador de temperatura debe ser

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

de acción inversa (al aumentar la temperatura baja la señal de salida). Si el caudal de producto es bajo, actuará la válvula de vapor V-1 porque la señal de salida estará comprendida entre 50-100% (9-15 psi). A medida que aumenta el caudal, el controlador de temperatura baja la señal gradualmente hasta que, cuando la señal baja de 50% (9 psi), la válvula V-1 permanece totalmente abierta con el primer intercambiador trabajando al máximo, y la válvula de control V-2 empieza a abrir iniciando el funcionamiento del segundo intercambiador. A un caudal máximo determinado, las dos válvulas de control están abiertas y los dos intercambiadores trabajan al máximo.

Otras aplicaciones residen en la protección de presión de un compresor con regulación del caudal de descarga, la utilización de varios tipos de combustibles en una caldera de vapor, etc.

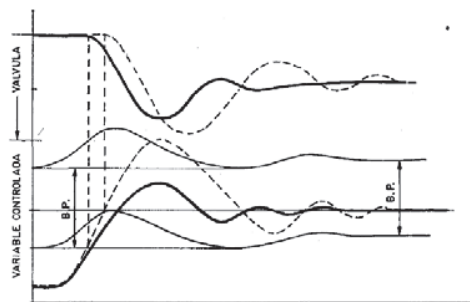
6.7.8.6 Control de procesos discontinuos.

En la industria química, en particular en la fabricación de polímeros, resinas, fibras y elastómeros se utilizan procesos discontinuos. En un reactor se introducen los productos a transformar y se someten a un programa de temperaturas determinado para cada producto resultante, repitiéndose ciclo tras ciclo la fabricación. Es esencial la uniformidad en la calidad del producto obtenido a través de los procesos discontinuos que se repiten, así como es conveniente la regulación precisa de las condiciones de la reacción para obtener siempre la misma calidad en el producto y evitar la pérdida total o parcial de una operación. Entre estas condiciones de reacción se encuentra la temperatura. Si el proceso no admite “offset”, que suele ser el caso usual, es necesario

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

que el controlador tenga como mínimo acción PI. Como entre el final de una operación (descarga del reactor) y el principio de la siguiente (carga de los productos y cierre del reactor) pasa un cierto tiempo, el error que se produce entre el punto de consigna y la temperatura (que baja hasta casi la temperatura ambiente) da lugar a que se acumule la acción integral quedando la válvula de control totalmente abierta. El resultado es como si la banda proporcional se desplazara con su límite inferior coincidiendo con el punto de consigna (si la variable estuviera por un tiempo por encima del punto de consigna ocurriría a la inversa y el límite superior de la banda proporcional bajaría hasta el punto de consigna). En la figura 7.27 puede verse la traslación de la banda proporcional.

Este corrimiento de la banda proporcional da lugar a elevadas oscilaciones de la temperatura al inicio de la operación ya que la válvula de control empieza a cerrar sólo cuando la variable cruza el punto de consigna porque entonces y sólo entonces el error entre la variable y el punto de consigna cambia de signo y la acción integral inicia ya la corrección..



Para prevenir este rebasamiento perjudicial, es necesario desplazar la banda proporcional hacia abajo con su límite superior coincidiendo con el punto de consigna cuando el

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

proceso está parado. De este modo, al arrancar la siguiente operación, la válvula de control empezará a cerrar cuando la temperatura entre dentro de la banda proporcional y la acción integral irá gradualmente elevando la banda proporcional hasta que queda fija con relación al punto de consigna y permanece así mientras estén alineados la variable y el punto de consigna y la señal de error sea nula. En un instrumento neumático, el desplazamiento de la banda proporcional se consigue bloqueando la señal neumática hacia el fuelle integral antes de la restricción integral y eliminando la presión acumulada hacia la atmósfera. Esta acción tiene lugar cuando la señal a la válvula de control supera los 15 psi (1 bar).

En un instrumento electrónico puede utilizarse un limitador de acción integral cuyo esquema simplificado puede verse en la figura y cuyo funcionamiento es el siguiente:

En la salida se conecta un amplificador operacional, que, en caso de que la señal de salida sobrepase un determinado valor (que será debido a la acumulación de la acción integral) conectará el transistor T_1 que descargará y anulará el condensador de acción integral C_i .

6.7.8.7 Controladores no lineales.

Existen procesos continuos que presentan cambios dinámicos considerables dependiendo del punto de operación, es decir, que sus ganancias y constantes de tiempo son variables según cuál sea el valor de alguna o algunas variables de la planta. Son procesos altamente no lineales que hacen difícil conseguir una buena sintonización del controlador.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

En un proceso que es altamente no lineal, tal como el de pH, con el punto de consigna en A, la ganancia necesaria para la estabilidad en el controlador (relación incrementos de la señal de salida a la válvula de control/variable del proceso) es baja (por ejemplo 0.05). Si por cualquier cambio de carga la variable pasa al punto B o al C, la baja ganancia del controlador hará que el pH del proceso permanezca en B o en C, y que se añada al sistema el reactivo suficiente para que el pH vaya pasando alternativamente de B a C, dibujándose en el registrador una zona rayada entre B y C.

La solución es el llamado **control planificado**, en el que conocida la no linealidad del proceso, es decir, las variables correlacionadas con la dinámica del mismo, se adaptan los parámetros del controlador en función del punto de operación. En el control por ganancia inversa la variable a ajustar es la ganancia. Se utiliza un controlador con características opuestas a las del proceso, en el que puedan seleccionarse la anchura de la zona muerta y la pendiente, de tal modo que la ganancia equivalente es:

$$\text{Ganancia equivalente} = 1 / (\text{ganancia dial} \times \text{pendiente})$$

O bien en banda proporcional:

$$\text{Ganancia equivalente} = \text{Banda proporcional dial} / \text{Pendiente}$$

Si la pendiente es 1, el controlador pasa a ser lineal.

6.7.8.8 Instrumentos auxiliares.

En el control de procesos es necesario, con frecuencia, transformar o relacionar entre sí las variables medidas para obtener todas las funciones necesarias del sistema de control. Estas relaciones o transformaciones se llevan a cabo en instrumentos llamados

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

“instrumentos auxiliares”, instalados generalmente detrás del panel de control o en un panel aparte y disponibles en el mercado tanto en instrumentos neumáticos como en electrónicos. Estas funciones auxiliares son realizadas de forma normal en los controladores digitales, tanto universales como formando parte del control distribuido. Los relés auxiliares tienen una gran importancia en el control industrial por la gran diversidad de funciones que pueden realizar. Figuran a continuación este tipo de instrumentos debiendo señalar que en las operaciones realizadas, las señales neumáticas y electrónicas tienen un “cero vivo” (3 psi en neumática o 4 mA c.c. en electrónica) por lo cual, a pesar de que en esta descripción se expongan fórmulas resumidas, es necesario restarles a las señales el valor 3 psi (o 0.2 bar), o bien 4 mA y expresarlas como porcentajes del campo de la señal de $15 - 3 = 12$ psi ($1 - 0.2 = 0.8$ bar) en neumática y de $20 - 4 = 16$ mA c.c. en electrónica.

Relés sumadores destinados a realizar operaciones diversas con varias señales de entrada (usualmente dos) y provistos de un factor ajustable K .

Relés de relación que se emplean en el control de relación de dos variables.

Relés multiplicadores o divisores que derivan de los relés de relación sustituyendo la constante por otra señal.

Relé inversor, empleado generalmente en instrumentos electrónicos.

Aislador de señal, utilizado en instrumentos electrónicos y que convierte una señal a otra en la relación 1:1, pero quedando aislados los circuitos electrónicos de ambas señales de entrada y de salida.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Otros instrumentos auxiliares existentes que pueden emplearse en operaciones muy diversas son los siguientes:

Convertidor mV a intensidad (mV /I), que permite la conversión de la señal procedente de un termopar.

Convertidor resistencia a intensidad (R/I) , que permite la conversión de la señal procedente de una sonda de resistencia o bien de la variación de resistencia de un reóstato final de un controlador eléctrico, a señal electrónica.

Convertidor I/P, que pasa de señal electrónica a señal neumática.

Convertidor P/I, que pasa de señal neumática a señal electrónica.

Convertidor mV/P, que realmente engloba dos instrumentos, el mV/I y el I/P y pasa, pues, de señal en milivoltios a señal neumática.

Convertidor R/P, que análogamente al anterior pasa de señal de resistencia a señal neumática gracias a dos aparatos, el R/I y el I/P.

Relés de alarma, ajustados a un valor prefijado de la variable que cierran uno o dos contactos. Pueden ser neumáticos efectuando el disparo entre 3 a 15 psi (0.2 a 1kg/cm²) y electrónicos, actuando entre 4 y 20 mA c.c.

Integradores, empleados generalmente en la totalización de caudal y que pueden ser tanto neumáticos como electrónicos.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.8. CALIBRACION DE LOS INSTRUMENTOS

6.8.1 Introducción

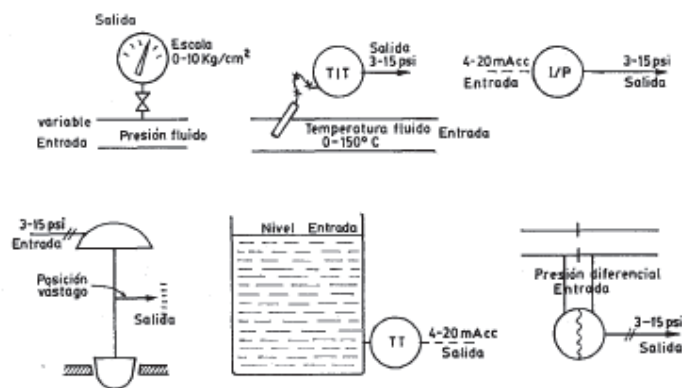
(48) “Se ha visto que los instrumentos industriales pueden medir, transmitir y controlar las variables que intervienen en un proceso. En la realización de todas estas funciones existe una relación entre la variable de entrada y la de salida del instrumento. Por ejemplo: presión del proceso a la lectura de presión en la escala de un manómetro; temperatura real a señal de salida neumática en un transmisor neumático de temperatura; señal eléctrica (4-20 mA c.c.) de entrada a señal neumática de salida en un convertidor I/P (intensidad a presión); señal de entrada neumática a posición del vástago del obturador en una válvula de control; nivel de un tanque a señal eléctrica estándar en un transmisor electrónico de nivel, etc. Esta relación puede encontrarse también en las partes internas del instrumento en particular cuando éste es complejo, como en el caso de un instrumento controlador miniatura para montaje en panel que está compuesto por varios bloques: unidad de punto de consigna (valor deseado de la variable medida), unidad de mando manual, unidad de control, etc. En la unidad de punto de consigna existirá una relación entre la posición del botón de mando y la señal estándar que va al bloque controlador. En la unidad de mando manual, la relación existirá entre la posición del botón del mando o indicación de posición y la señal de salida a la válvula de control.

Finalmente, en la unidad de control estarán ligadas la señal de error (diferencia entre el punto de consigna y la variable) y la señal de salida a la válvula de control, relación que será función de las acciones que posea el controlador. En el caso de un transmisor de

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

caudal de diafragma pueden considerarse dos bloques: el elemento de presión diferencial y el transmisor. En el primero estarán relacionados la diferencia de presiones de entrada (provocada por el elemento de presión diferencial-placa-orificio) con el giro del eje de salida del cuerpo, mientras que en el segundo la entrada será el giro del eje de salida del cuerpo y la salida la señal estándar de salida del transmisor”.

En la figura, pueden verse estas funciones en varios tipos de instrumentos.



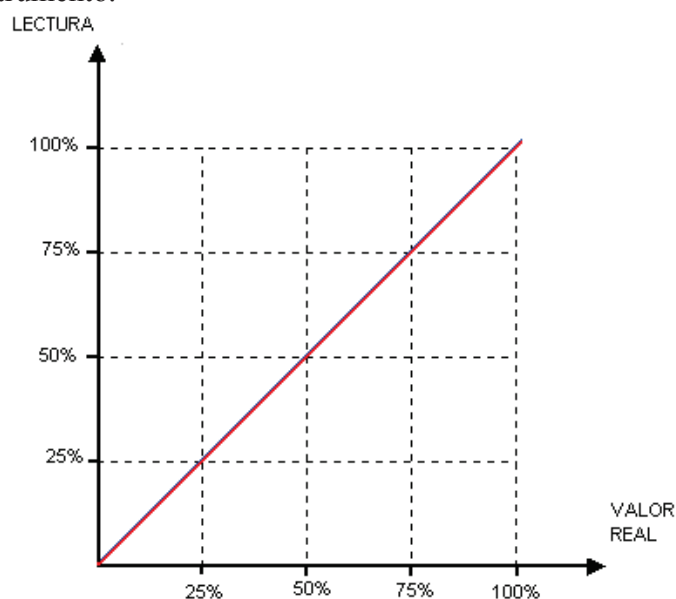
Así pues, un instrumento o una de sus partes pueden considerarse como dispositivos de conversión de señales (transductores) que pasan de una variable de entrada (presión, caudal, nivel, temperatura, posición, pH, conductividad, etc.), a una o varias de las siguientes funciones en la salida: indicación de la variable de entrada, lectura de un índice o de una pluma de registro; transmisión de la variable de entrada en señal neumática o eléctrica; fijación de la posición de una palanca o de un vástago de una varilla interna del instrumento o del vástago del obturador de una válvula. Existirá, pues, una correspondencia entre la variable de entrada y la de salida, representando esta última el valor de la variable de entrada. Siempre que el valor representado corresponda

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

exactamente al de la variable de entrada el instrumento estará efectuando una medición correcta. Ahora bien, en la práctica, los instrumentos determinan en general unos valores inexactos en la salida que se apartan en mayor o menor grado del valor verdadero de la variable de entrada, lo cual constituye el error de la medida. El error es universal e inevitable y acompaña a toda medida, aunque ésta sea muy elaborada, o aunque se efectúe un gran número de veces. Es decir, el valor verdadero no puede establecerse con completa exactitud y es necesario encontrar unos límites que lo definan, de modo que sea práctico calcular la tolerancia de la medida.

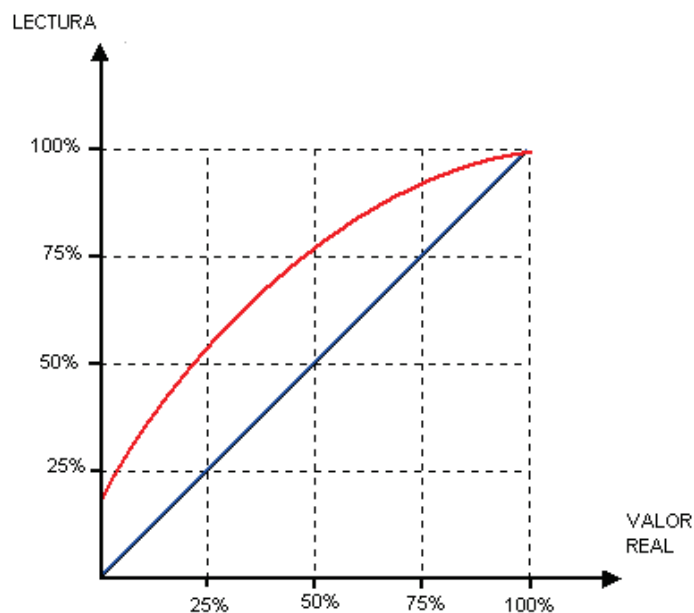
6.8.2. Errores de los instrumentos. Procedimiento general de calibración.

Un instrumento representativo, 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 o registrado o transmitido, está comprendida entre los límites determinados por la precisión del instrumento.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

En un instrumento ideal (sin error), como se presenta en la figura, la relación entre los valores reales de la variable comprendidos dentro del campo de medida, y los valores de lectura del aparato, es lineal. En la figura, puede verse esta relación. En particular, si el instrumento es un transmisor neumático, cuando el índice adopta las posiciones 0, 50, 100 % de la escala, las señales de salida correspondientes son: 3, 9 y 15 psi respectivamente. Si el instrumento fuera electrónico, 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 consideraríamos el instrumento calibrado aunque no coincidiera exactamente la curva variable-lectura con la recta ideal.

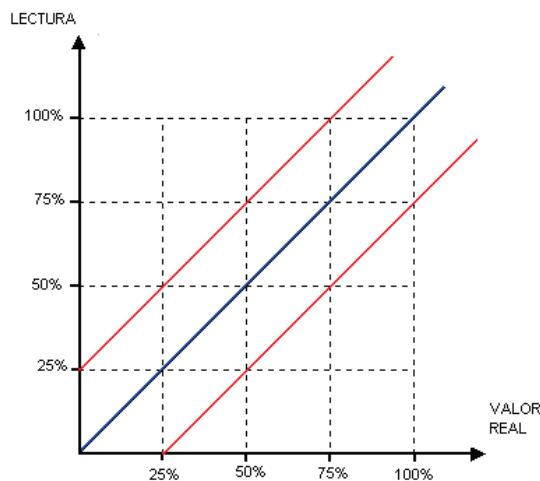


Instrumento Descalibrado

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

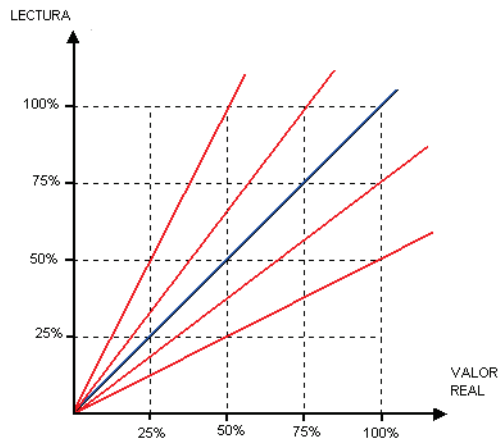
Las desviaciones de la curva variable real-lectura de un instrumento típico, tal como el de la figura, con relación a la recta ideal representan los errores de medida del aparato. Esta curva puede descomponerse en tres que representan individualmente los tres tipos de errores que pueden hallarse en forma 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 10.4, en la que se observará 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.

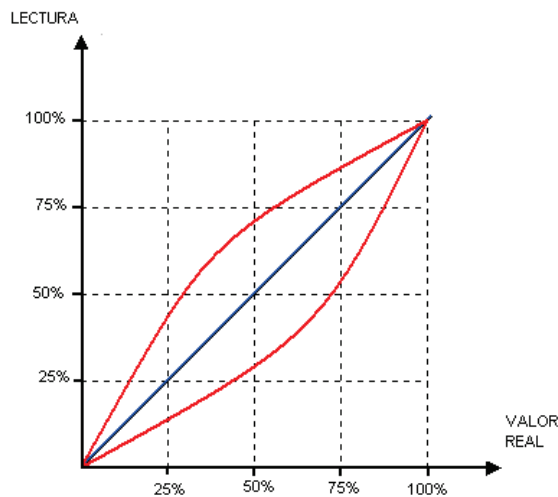


Error de multiplicación (span). Todas las lecturas aumentan o disminuyen progresivamente con relación a la recta representativa, según puede verse en la figura, en la que se observará que el punto base no cambia y que la desviación progresiva puede ser positiva o negativa.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO



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, puede verse un error de este tipo. El máximo de la desviación suele estar hacia la mitad de la escala. 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, tal como la representada en la figura.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

En general, el error de cero se corrige con el llamado tornillo de cero, que modifica directamente la posición del índice o de la pluma de registro cambiando la curva variable-lectura paralelamente a sí misma, o bien sacando el índice y fijándolo al eje de lectura en otra posición. El error de multiplicación se corrige actuando sobre el tornillo de multiplicación (o span, en inglés) que modifica directamente la relación de amplitud de movimientos de la variable al Índice o a la pluma, es decir, que aumenta o disminuye progresivamente las lecturas sobre la escala. Para calibrar un instrumento conviene, en primer lugar, eliminar o reducir al mínimo el error de angularidad. Este error es debido fundamentalmente a la transmisión por palancas del movimiento del elemento primario o de la variable medida al Índice de lectura o de registro (fig.).

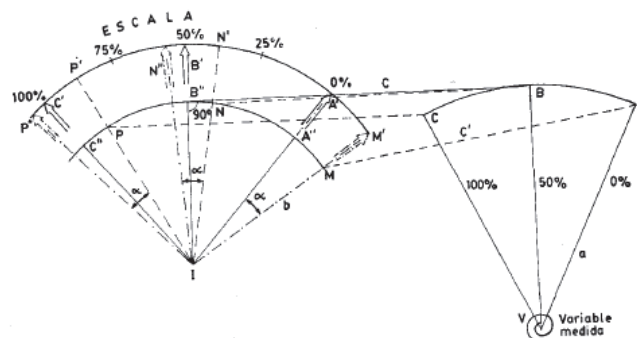


Fig. 10.7 Corrección de angularidad.

49 “El error de angularidad será nulo cuando las palancas queden exactamente a escuadra con la variable al 50 % de su valor. Es fácil ver en la figura que, en esta posición, cualquier cambio angular en la posición del brazo del elemento primario se reproduce en forma lineal en el brazo del índice o de la pluma, y no existe error de angularidad. La

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

operación inicial de situar las palancas perpendiculares entre sí, recibe el nombre de escuadrado previo de las palancas. Si ahora, con la variable a 0 % se acorta intencionalmente a la longitud c' la varilla c de unión de las palancas, ocurrirá que la posición del brazo de la variable será la $V A$, y la del índice será IM' , de modo que será necesario ajustar el cero para que el índice pase de IM' a la posición IA' correspondiente a 0 % de la escala". Con este ajuste, el índice ha quedado desplazado un ángulo $M'IA' = \alpha$ con respecto al brazo b . En la figura puede verse que para los valores de la variable de 50 y de 100 %, las posiciones del índice son N'' y P'' , y las de su brazo N y P respectivamente, para las cuales el movimiento de la varilla de unión es mayor entre 0 y 50 %, que entre 50 y 100 %. Por este motivo; la pluma señalará un valor alto para el valor medio de la variable; este valor es el N'' con la condición de que el ángulo $N' IN'' = \alpha$

El error de angularidad anterior se ha obtenido acortando la varilla de conexión, de modo que para eliminarlo hay que aumentar la longitud de ésta. Pero, con el ajuste de cero efectuado, este alargamiento da lugar a que la pluma señale un valor todavía más alto para el valor medio de la variable. Por consiguiente, para corregir el error de angularidad es necesario realizarlo en la dirección contraria a la lógica, es decir, en la misma dirección del error. De lo expuesto se desprende que el error de angularidad puede eliminarse procediendo al escuadrado previo de las palancas para el valor de 50 % de la variable, o bien, actuando sobre el tornillo de angularidad para aumentar el valor del error en la dirección del mismo. En la práctica se suele considerar que este aumento es de

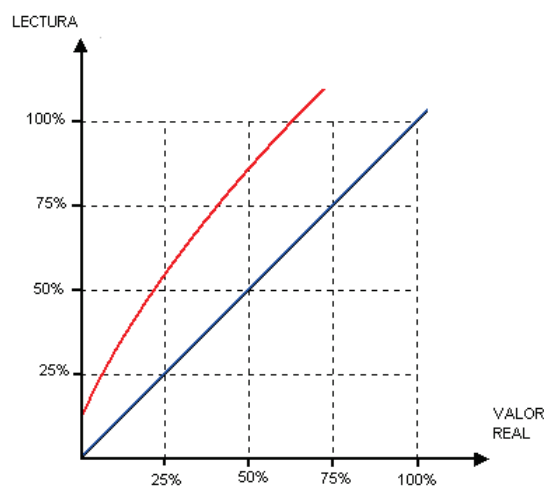
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

unas cinco veces el error encontrado. Hay que hacer notar que la acción del tornillo de angularidad consiste en realidad en alargar o acortar la longitud de la varilla de unión entre el brazo de la variable y el del índice o pluma.

También puede ajustarse la angularidad deslizando la palanca de la variable sobre su eje de tal modo que el ángulo que forma con la palanca de interconexión sea recto para el valor de 50 % de la variable.

Sentadas estas bases, el procedimiento general para calibrar un instrumento será el siguiente:

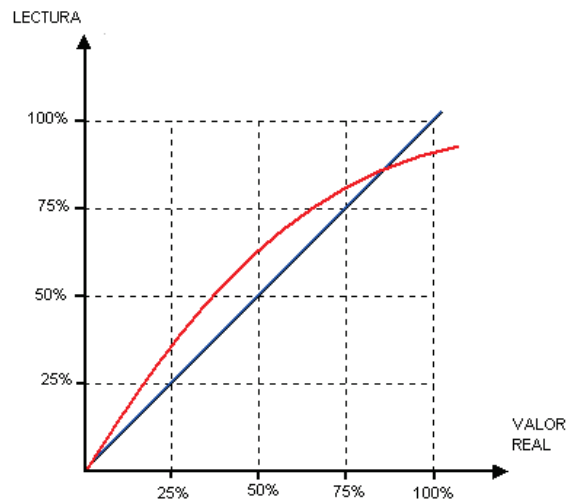
Procedimiento General para Calibrar un Instrumento.



Inicial

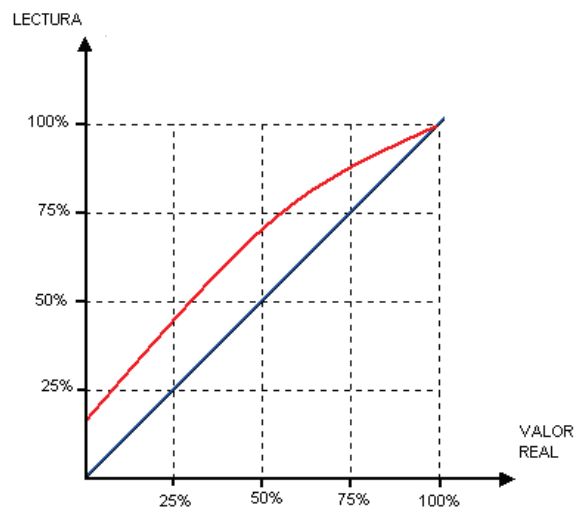
1. Situar la variable en el valor mínimo del campo de medida, y en este valor ajustar el tornillo de cero del instrumento hasta que el índice señale el punto de base (fig. b).

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO



Ajuste de Cero

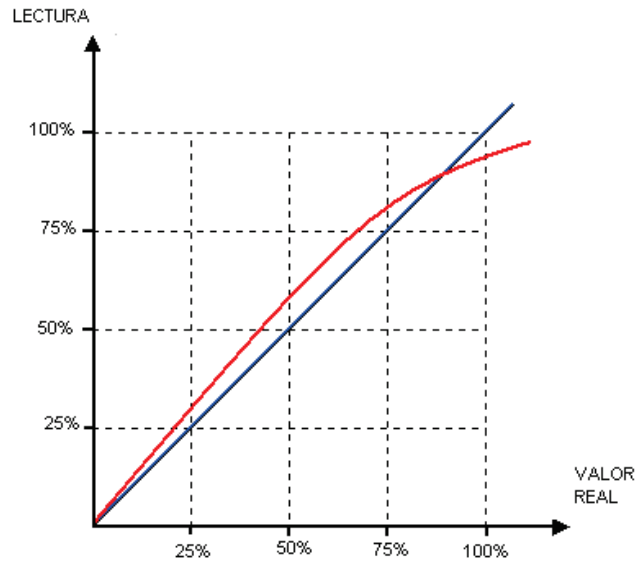
2. Colocar la variable en el valor máximo del campo de medida, y en este valor ajustar el tornillo de multiplicación hasta que el índice señale el valor máximo de la variable (fig. c).



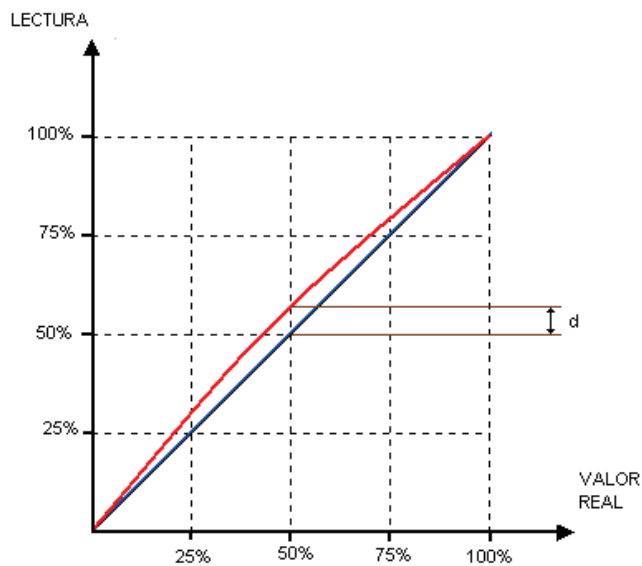
Ajuste de Multiplicación o Spam

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

3. Repetir los puntos anteriores 1 y 2 sucesivamente, hasta que las lecturas sean correctas en los valores mínimo y máximo (figs. d y e).



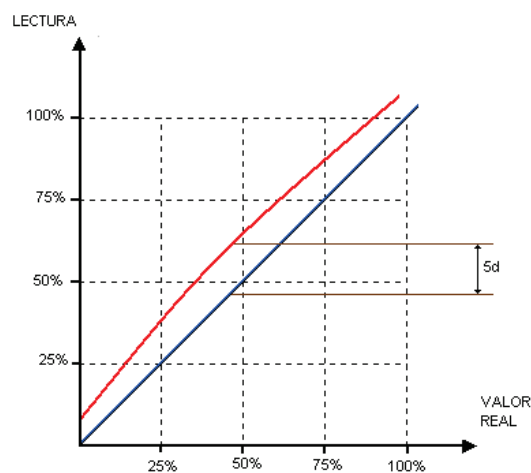
Ajuste de Cero



Ajuste de span y comprobación del error de angularidad

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

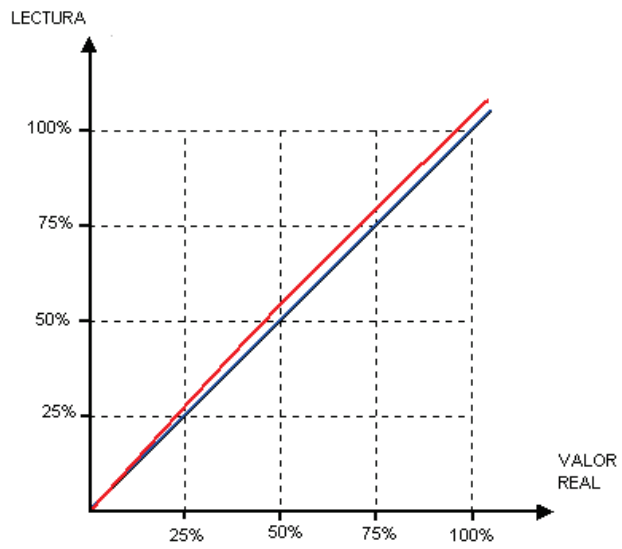
- Colocar la variable en el cincuenta por ciento del intervalo de medida, y en este punto ajustar el tornillo de angularidad hasta mover el índice cinco veces el valor del error en la dirección del mismo (la curva real se aplana). Es de interés señalar que puede prescindirse de este paso procediendo previamente al escuadrado de las palancas para el 50 % de la variable (fig. f).



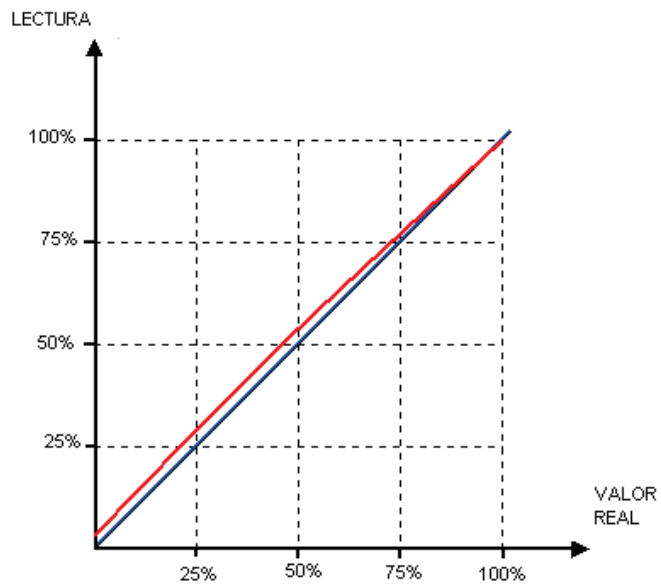
Ajuste de angularidad

- Reajustar sucesivamente el tornillo de cero y el de multiplicación, hasta conseguir la exactitud deseada o requerida (figs. g, h, i). Si fuera necesario, efectuar una nueva corrección de angularidad.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

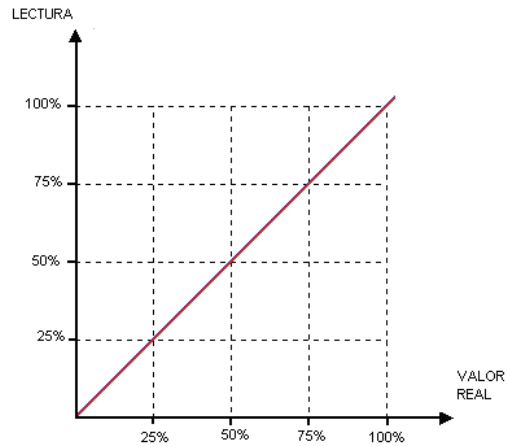


Ajuste de Cero



Ajuste de Multiplicación o Spam

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO



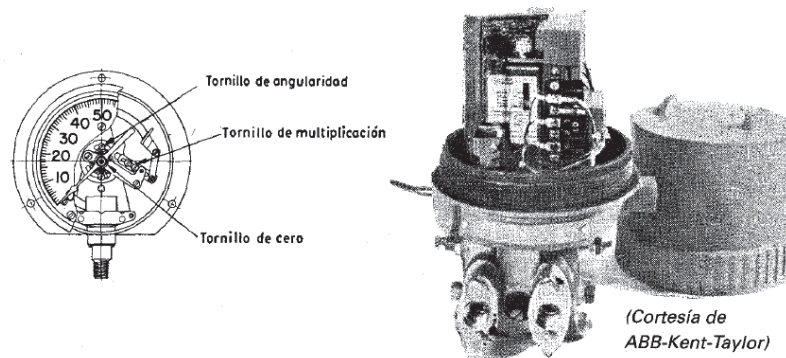
Ajuste de cero y final

Este procedimiento es general, con la salvedad de sustituir la palabra índice por pluma y señal de salida en los casos de instrumentos registradores y transmisores neumáticos (señal de salida, 3-15 psi) o electrónicos (4-20 mA c.c.) respectivamente. La posición de los tornillos de ajuste de cero, de multiplicación y de angularidad, varía según el instrumento; algunos tipos carecen de alguno de ellos.

En particular debe señalarse que los termómetros bimetálicos tienen usualmente tornillo de cero; los manómetros poseen tornillo de cero (o en su lugar es posible desmontar el índice y ajustarlo al eje en otra posición), de multiplicación y de angularidad, y los instrumentos electrónicos no suelen tener error de angularidad (figura). Lo dicho hasta ahora se refiere a los instrumentos convencionales neumáticos y electrónicos. En los instrumentos digitales inteligentes, en particular en los transmisores, la calibración se ve facilitada por la inteligencia proporcionada por el microprocesador incorporado en el instrumento. Éste guarda digitalmente en una EPROM los datos que proporcionan

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

correcciones precisas de las no linealidades de los sensores ante variaciones en la temperatura y en la presión ambiente, para toda la vida útil del instrumento.



(50) “Se encuentran grabados unos 126 puntos o más en lugar de los cinco típicos (0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %) con los que se calibra un instrumento convencional. Un comunicador portátil dotado de visualizador de cristal líquido y teclado alfanumérico permite comprobar desde el propio transmisor, o bien desde el controlador, o desde cualquier punto de la línea de conexión (dos hilos), el estado y calibración del transmisor. Estos instrumentos presentan pues la ventaja de que no es necesaria su calibración. En todo caso, puede ajustarse el aparato enviando a través del teclado alfanumérico del comunicador el número de identificación del instrumento y los valores inferior y superior del campo de medida con los que se desea reajustar el aparato”. Si se presenta una avería directa en el elemento en contacto con el proceso (por ejemplo, una perforación en la membrana de un transmisor de nivel) precisará el cambio del aparato o el del módulo en contacto con el proceso, pero tampoco será necesaria la calibración en el taller con aparatos patrón. A señalar que la utilización de los instrumentos inteligentes representa un ahorro del 95 % con relación a los costos de recalibración de los instrumentos

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

convencionales. La exposición precedente se ha referido a los instrumentos representativos. Es evidente que el sistema de calibración es general, si bien, en algunos instrumentos particulares existen otros procedimientos más rápidos que están incluidos en el manual de instrucciones del fabricante. Otros tipos de errores provienen de la lectura del instrumento por el observador, y son:

Error de paralaje, que se produce cuando el observador efectúa la lectura de modo que su línea de observación al Índice no es perpendicular a la escala del instrumento. La importancia de este error depende de la separación entre el índice y la escala y del ángulo de inclinación de la línea de observación. Para disminuirlo, algunos instrumentos tienen el sector graduado separado de la escala y a muy poca distancia del índice, y otros poseen un sector espejular, con lo que la línea de observación debe ser perpendicular a la escala para que coincidan el índice y su imagen.

Error de interpolación, que se presenta cuando el índice no coincide exactamente con la graduación de la escala, y el observador redondea sus lecturas por exceso o por defecto. Evidentemente, estos errores de paralaje y de interpolación no existen en los instrumentos de salida digital. La calibración de los instrumentos requiere disponer de aparatos patrones y de dispositivos de comprobación colocados usualmente en el taller de instrumentos. La precisión de estos instrumentos patrón debe ser como mínimo $1/4$ de la precisión de los instrumentos a comprobar (Normas DIN 16-005, Mil-std-45662A). Es decir, si el instrumento a comprobar tiene una precisión de $\pm 0,5 \%$, el instrumento patrón debe tener un mínimo de precisión de $\pm 0,125 \%$. Si los aparatos patrón tienen una

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

precisión de 1/10 de los instrumentos a comprobar, su efecto sobre la medida puede ignorarse.

6.8.3. Calibración de instrumentos de presión, nivel y caudal.

Para calibrar los instrumentos de presión pueden emplearse varios dispositivos que figuran a continuación, y que utilizan en general manómetros patrón. Los manómetros patrón (fig. a) se emplean como testigos de la correcta calibración de los instrumentos de presión.



Son manómetros de alta precisión con un valor mínimo de 0,2 % de toda la escala. Esta precisión se consigue de varias formas:

1. Dial con una superficie especular, de modo que la lectura se efectúa por coincidencia exacta del índice y de su imagen, eliminando así el error de paralaje.
2. Dial con graduación lineal, lo que permite su fácil y rápida calibración.
3. Finura del índice y de las graduaciones de la escala.
4. Compensación de temperatura con un bimetálico.
5. Tubo Bourdon de varias espiras.
6. Se consigue una mayor precisión (de 0,1 %) situando marcas móviles para cada incremento de lectura del instrumento.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

También pueden utilizarse como aparatos patrón de presión, los transmisores digitales inteligentes, por la precisión elevada que poseen, del orden del $\pm 0,2 \%$.

La calibración periódica de los manómetros patrón se consigue con el comprobador de manómetros de peso muerto, o con el digital.



Puede verse en la figura, y consiste en una bomba de aceite o de fluido hidráulico con dos conexiones de salida, una conectada al manómetro patrón que se está comprobando, y la otra a un cuerpo de cilindro dentro del cual desliza un pistón de sección calibrada que incorpora un juego de pesas.

La calibración se lleva a cabo accionando la bomba hasta levantar el pistón con las pesas y haciendo girar éstas con la mano; su giro libre indica que la presión es la adecuada, ya que el conjunto pistón-pesas está flotando sin roces. Una pequeña válvula de alivio de paso fino y una válvula de desplazamiento, permiten fijar exactamente la presión deseada cuando se cambian las pesas en la misma prueba para obtener distintas presiones, o cuando se da inadvertidamente una presión excesiva. Existen dos tipos de pistones, de baja y de alta presión, con juegos de pesas que permiten obtener márgenes muy variados

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

(por ejemplo: 0-20, 2-100, 30-150, 70-350. 140-700 bar). La precisión de la medida llega a ser del orden de 0,1 %. Un comprobador de manómetros de peso muerto puede alcanzar una precisión de $\pm 0,06$ %, y los pistones y las pesas utilizados pueden certificarse a $\pm 0,008$ %. El uso frecuente del comprobador puede degradar la precisión en $\pm 0,015$ % por año, por lo que puede ser necesaria una recertificación periódica.

El comprobador de manómetros portátil utiliza la misma bomba empleada en el comprobador anterior (fig. b) y se utiliza para comprobar manómetros e instrumentos de presión, utilizando un manómetro patrón.



Su funcionamiento es parecido al del comprobador anterior, excepto que las dos conexiones de salida se destinan una al manómetro patrón y la otra al instrumento de presión a comprobar.

El comprobador de manómetros digital , consiste en un tubo Bourdon con un espejo soldado que refleja una fuente luminosa sobre un par de foto diodos equilibrados. Se genera así una señal de corriente que crea un par igual y opuesto al de la presión que actúa sobre el tubo Bourdon. Una resistencia de precisión crea una señal de tensión directamente proporcional a la presión del sistema.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Complementando el instrumento anterior con potenciómetros de ajuste y una servoválvula se obtiene un comprobador de presión de precisión. La precisión del comprobador de manómetros digital alcanza $\pm 0,003$ % de toda la escala, con una estabilidad de $\pm 0,005$ % de la lectura. Añadiendo un ordenador y el software adecuado se consigue una automatización de la calibración con salida gráfica y por impresora, lo que permite satisfacer los requerimientos de la norma de calidad ISO 9000. Para presiones bajas, del orden de 1 bar, se emplean columnas de mercurio portátiles para pruebas en campo, o de fijación mural en el taller de instrumentos.

Según el modelo disponen de tres tipos de graduaciones: 0-1000 mm columna de mercurio (c. de Hg.), 0-1,4 bar o de 0-20 psi. Estas columnas de mercurio tienen conexiones en la parte inferior y superior aptas para la medida de presión y de vacío, respectivamente. Para la medida de presiones más bajas se utilizan columnas de agua hasta 1,5 m de longitud, que tienen asimismo conexiones en la parte inferior y superior para medir presión o vacío, respectivamente. Las columnas de mercurio y de agua descritas y un juego de manómetros patrón, se disponen generalmente en un panel o banco de pruebas de instrumentos que incorpora una bomba de vacío y filtros manorreductores de aire de precisión conectados al aire de instrumentos de la planta.

En la figura puede verse un esquema del banco de pruebas de instrumentos. Los calibradores de presión portátiles de precisión son un buen sustituto del banco de pruebas de instrumentos descrito para presiones hasta 20 bar. Mediante una bomba manual

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

pueden generar vacíos hasta - 800 mbar y presiones hasta 20 bar. En la figura puede verse un esquema del calibrador.



Los resultados de la calibración pueden almacenarse en la memoria del instrumento y analizarse más adelante o transferirse a un ordenador vía la interfaz RS232. El sistema de calibración integrado permite el uso de la norma de calidad ISO 9000. El calibrador alcanza una precisión de $\pm 0,05\%$ de la lectura de presión efectuada. Un instrumento de nivel de presión diferencial se calibra disponiéndolo en el banco de pruebas con la conexión de alta conectada a un manorreductor y a una columna de agua o de mercurio para simular el campo de medida y la conexión de baja abierta a la atmósfera; la parte transmisora neumática o electrónica se alimenta aparte y su señal de salida va a una columna de mercurio del banco, en caso de señal neumática, o a una maleta comprobadora de instrumentos electrónicos en caso de señal eléctrica. La simulación del campo de medida se consigue transformando a presión la altura del líquido en el tanque del proceso y reproduciendo esta presión con el manorreductor del banco de pruebas. Un instrumento de nivel de desplazamiento se calibra conectándolo a un tubo en U

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

transparente que permite ver la altura de agua. La variación de la altura de agua en el tubo simula los puntos de nivel en todo el campo de medida y en el ensayo se sitúa el ajuste de densidad del instrumento en el valor 1. Una vez calibrado el instrumento bastará cambiar el ajuste de densidad al valor que tenga el líquido del proceso. En algunos instrumentos, el fabricante proporciona pesos calibrados para simular el nivel; en este caso no hay necesidad de sumergir el flotador en agua. Los rotámetros no pueden calibrarse, exceptuando la parte transmisora cuando la llevan incorporada. Los rotámetros para líquidos se comprueban haciendo pasar agua, de modo tal que la indicación del rotámetro se mantenga en un valor constante y recogiendo el agua en un tanque de capacidad conocida o en un depósito colocado sobre una báscula. Esta capacidad dividida por el tiempo transcurrido en la experiencia dará el caudal, que deberá coincidir con la indicación del rotámetro, teniendo en cuenta naturalmente las correcciones de peso específico, temperatura y viscosidad del fluido real comparado con el agua (fluido de ensayo). La comprobación del rotámetro puede realizarse también intercalando otro rotámetro de precisión en serie y comparando las dos indicaciones.

Los rotámetros para gases se calibran con un rotámetro de precisión en serie haciendo pasar aire. Se comparan las dos indicaciones afectadas de los correspondientes factores de corrección de peso específico, temperatura y presión. Otro sistema de calibración, utilizado en rotámetros de pequeño tamaño, emplea un tubo cilíndrico graduado con un pistón sellado mediante mercurio para evitar fugas. Al bajar el pistón con regularidad hace pasar aire a través del rotámetro bajo observación. El volumen de aire gastado

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

dividido por la duración del ensayo, medida mediante un cronómetro, da el caudal que debe corresponderse con la posición del flotador afectada lógicamente de los coeficientes de corrección correspondientes.

6.8.4. Calibración de instrumentos de temperatura.

Para la calibración de instrumentos de temperatura se emplean baños de temperatura (calibradores de bloque metálico, de baño de arena y de baño de líquido), hornos y comprobadores potenciométricos.

El calibrador de bloque metálico (figura a) consiste en un bloque metálico calentado por resistencias con un controlador de temperatura de precisión ($\pm 2^\circ \text{C}$) adecuado para aplicaciones de alta temperatura (- 25 a 1200°C).



El control de temperatura se realiza con aire comprimido, lo que permite reducir la temperatura desde 1200°C a la ambiente en unos 10-15 minutos. En el calibrador hay orificios de inserción para introducir un termopar patrón y la sonda de temperatura a comprobar. Pueden programarse las temperaturas y la pendiente de subida o bajada y comunicarse a un ordenador.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

El calibrador de baño de arena (figura b) consiste en un depósito de arena muy fina que contiene tubos de inserción para la sonda de resistencia o el termopar patrón y para las sondas de temperatura a comprobar. La arena caliente es mantenida en suspensión por medio de una corriente de aire, asegurando así la distribución uniforme de temperaturas a lo largo de los tubos de inserción.



El calibrador de baño de líquido (figura c), consiste en un tanque de acero inoxidable lleno de líquido, con un agitador incorporado, un termómetro patrón sumergido y un controlador de temperatura que actúa sobre un juego de resistencias calefactoras y sobre un refrigerador mecánico dotado de una bobina de refrigeración.



En algunos modelos no existe el refrigerador. El agitador mueve totalmente el líquido, disminuye los gradientes de temperatura en el seno del líquido y facilita una transferencia

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

rápida de calor; el termómetro patrón es de tipo laboratorio, con una gran precisión; el controlador de temperatura puede ser todo-nada, proporcional o proporcional más integral. Los hornos de temperatura (fig. h) son hornos de mufla calentados por resistencias eléctricas y con tomas adecuadas para introducir los elementos primarios (termopar) del instrumento a comprobar.



Si bien estos hornos son de temperatura controlada disponiendo de indicador controlador, un termopar de precisión y de un juego de resistencias de calentamiento, una calibración muy precisa se conseguirá disponiendo en el interior del horno crisoles con materiales específicos que funden a temperaturas determinadas. Los comprobadores potenciométricos se emplean para comprobar las características f.e.m.-temperatura de los termopares, para medir la temperatura con un termopar y para calibrar los instrumentos galvanométricos y potenciométricos. Constan de un galvanómetro, un elemento de estandarización de tensión y un reóstato de selección de f.e.m., combinado con un selector. Esencialmente, el aparato puede medir y generar f.e.m. en corriente continua con varios márgenes que van de 0-0,182 a 0-182 mV, y con tensiones por división de 0.0001 V a 0.1 mV respectivamente.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

La precisión es elevada, del orden del 0-2 %. Hay que señalar que debe tenerse en cuenta el efecto de autocompensación de temperatura del instrumento que se está verificando. Para ello se coloca un termómetro de vidrio en la caja del instrumento y se procede del modo siguiente:

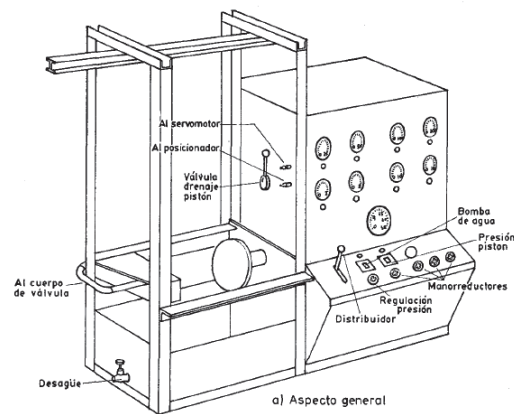
1. Se determina la temperatura de la unión fría del instrumento por lectura del termómetro de vidrio.
2. En las tablas de f.e.m. (referidas a 0°C) se determinan los mV correspondientes a la temperatura de la unión fría y los correspondientes a la temperatura a verificar del instrumento.
3. La diferencia algebraica entre los dos valores anteriores se sitúa en el comprobador debiendo el instrumento leer la temperatura a verificar.

Si se desea comprobar el estado de un termopar los pasos a seguir son los anteriores, pero sumando los valores en m V de la temperatura ambiente y de la generada por el termopar. Los mV resultantes se pasan a temperatura mediante la tabla de f.e.m.

6.8.5. Comprobación de válvulas de control.

El banco de prueba de válvulas de control consiste en un juego de bridas, una móvil y la otra fija, con una bomba manual para fijar la válvula, una bomba de agua con circuito intensificador de presión, reguladores de presión y un juego de manómetros patrón. En la figura 8.5.1. puede verse un esquema simplificado del circuito oleohidráulico y neumático del banco. Las pruebas que se pueden efectuar en las válvulas de control son:

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

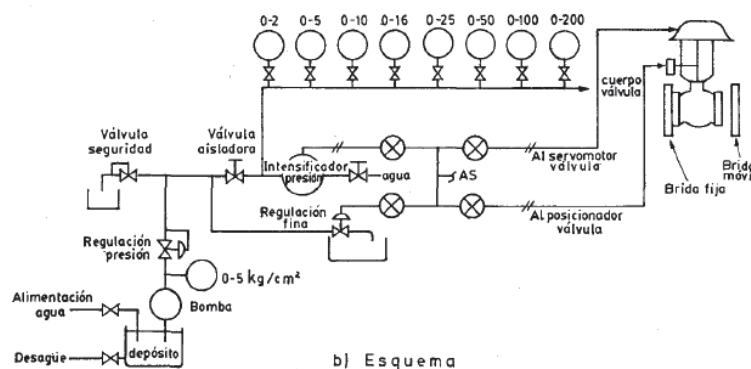


- ✚ Prueba hidrostática del cuerpo de la válvula bombeando el agua a presión a través de la brida fija.
- ✚ Prueba de estanqueidad de la estopada.
- ✚ Prueba de estanqueidad de la válvula con el obturador en posición de cierre, midiendo la cantidad de agua de fuga en un tiempo dado y comparándola con la dada por el fabricante de la válvula; una cantidad excesiva indicará un desgaste anormal en el cierre obturador-asiento.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

- Prueba de funcionamiento de la válvula, medida de su histéresis y, calibración de la misma y prueba del posicionador.

Como es natural, las restantes características de la válvula (determinación del C_v o K_v , determinación de la máxima presión diferencial admisible con la válvula en posición de cierre, etc.) son más bien de interés para el fabricante que determina y garantiza dichos datos que para el usuario. Su determinación obliga a la construcción de bancos de prueba costosos con instrumentos de medida de caudal, bombas de gran capacidad y tuberías de gran longitud, según sea el tamaño de la válvula.



Sin embargo, los datos de fabricación pueden ser facilitados por los fabricantes mediante posicionadores inteligentes montados en la válvula (de acceso local por teclado, o mediante un protocolo de comunicaciones y un ordenador personal) que aportan las siguientes funciones:

- Lazo local de control PID, de ajuste manual o autosintonizable.
- Calibración automática de la válvula.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Funciones de diagnóstico para el servicio de mantenimiento:

- ✚ Caracterización de la curva característica de la válvula.
- ✚ Rozamiento e histéresis de la válvula.
- ✚ Longitud recorrida por el vástago de la válvula (odómetro).
- ✚ Velocidad del vástago.
- ✚ Análisis dinámico (respuesta ante una entrada en escalón).
- ✚ Histórico de configuración y calibraciones de la válvula.

6.8.6. Aparatos electrónicos de comprobación.

(51) “Los diversos aparatos utilizados en la detección de averías de los instrumentos electrónicos permiten efectuar todas las operaciones de calibración y prueba de los instrumentos electrónicos, tales como: alimentación del instrumento, suministro de una tensión o corriente de entrada que simule la señal del proceso, indicación de la señal de entrada o salida, comprobación de la sensibilidad, tiempo de respuesta, linealidad e histéresis de los instrumentos y localización rápida de las averías en los bucles de control”.

Medidor Geiger para verificación y calibración de instrumentos de radiación que emplean isótopos radiactivos.

Ordenador personal que puede utilizarse como procesamiento de textos, bases de datos, calibración automática y como registro general de variables de proceso mediante placas de entrada y salida de datos.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Osciloscopio, que permite comprobar partes del circuito de un instrumento electrónico por comparación de las curvas de salida con las dadas por el fabricante, aparte del uso normal del mismo en la detección general de averías en los circuitos electrónicos y en la medida de tensiones. Su precisión típica es de 3 a 5 % para frecuencias hasta 100 Hz. A señalar que en algunas aplicaciones es sustituido por el ordenador personal.

Estabilizador de tensión, para la alimentación general de los aparatos electrónicos del taller. Polímetro general, para medidas generales de tensión, intensidad, resistencia y capacidad.

Voltímetro digital de c.c., que permite medir tensiones con una precisión de $\pm 0,1$ % e incluso de $\pm 0,01$ %.

Otros accesorios forman parte del taller de instrumentos, y entre ellos se encuentran: Tomos de pequeñas dimensiones, máquinas para limpieza de piezas grandes y medianas, máquinas de taladrar, fijas y portátiles, pulidora, herramientas varias de taller (equipo para soldadura de plata, soldador eléctrico, soldador a la autógena, juego de llaves inglesas y fijas, cortador de juntas, cortatubos, machos y terrajas de roscar, etc.), equipo especial de soldadura para la fabricación de termopares, etc.

Herramientas manuales (destornilladores de relojero, pinzas, llaves inglesas y de tubo, limpiadores de plumilla para aparatos registradores, martillos, alicates, mordazas, sierras de mano, etc.).

Conjuntos de emisor-receptor portátil para intercomunicación en la calibración de instrumentos y detección de averías en la planta.

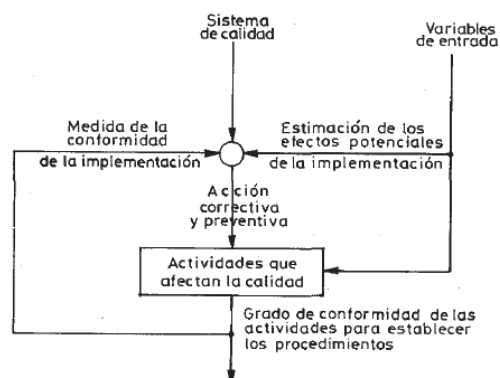
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.7.7. Calidad de calibración según Norma ISO 9002

La norma ISO 9000 (ISO es International Organization for Standardization) fue publicada en 1987 y consta de cinco partes:

- ISO 9000. Generalidades.
- ISO 9001. Proyecto, fabricación, instalación y servicios.
- ISO 9002. Producción e instalación.
- ISO 9003. Inspección y ensayo final del producto.
- ISO 9004. Sistemas de dirección de la calidad.

La norma ISO 9002 abarca específicamente la dirección de la calidad en el proceso de producción del producto y define, en forma de instrucciones y procedimientos, la forma específica en que debe operar una empresa. Todo el conjunto de la información generada constituye el Sistema de Calidad, el cual asegura a los clientes de la empresa que los productos que ellos compran están perfectamente controlados. La calidad queda mejor asegurada a través del control de la fabricación y de los procesos, que después de la inspección de los productos terminados.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

En la figura, puede verse una representación en forma de lazo de control de realimentación y anticipativo de la Norma ISO 9000.

Desde el punto de vista de la aplicación de la norma ISO 9002, el término verificación de los instrumentos significa la comprobación de que cada instrumento incluido dentro de la norma ISO 9002 está dentro de la tolerancia en la medida aceptada por el Departamento de fabricación de la empresa. Esta definición se aparta de la clásica de calibración realización de las operaciones necesarias para que el instrumento tenga los mínimos errores posibles como si hubiera salido de inspección de la fábrica del suministrador.

Con relación al apartado de Equipos de inspección, medida y ensayo , el sistema de calidad ISO 9002 establece que el suministrador de un producto debe:

- Identificar, calibrar y ajustar todo el equipo de inspección, medida y ensayo que puede afectar la calidad del producto, a intervalos definidos con relación a equipos de calibración certificados por un organismo reconocido.
- Establecer, documentar y mantener los procedimientos de calibración de los instrumentos y de los equipos de calibración.
- Asegurar que las condiciones ambientales son adecuadas para las operaciones de calibración, inspección, medida y ensayos que se efectúen en los instrumentos.

La implantación de la norma ISO 9002 presupone la redacción de manuales de calibración de los instrumentos afectados (clave en la obtención de la calidad esperada del producto fabricado por la empresa), la creación de procedimientos documentados para la calibración y la conformidad o no conformidad de los instrumentos y equipos de

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

calibración, el entrenamiento del personal destinado a la calibración ISO 9002, y la creación de un área separada dentro del taller de instrumentos donde se encontrarán ubicados los equipos y herramientas de calibración.

El período de calibración de cada instrumento es fijado por la propia empresa, de acuerdo con la experiencia que posea sobre el trabajo en la planta. Normalmente suele ser de un año para los aparatos normales.

A señalar que existen en el mercado calibradores compactos controlados por microprocesador para la calibración de presión, temperatura, frecuencia y otras variables de proceso, que, ligados con un pc, automatizan el proceso de calibración permitiendo almacenar en disquete y registrar en impresora los datos de los instrumentos calibrados.

Las compañías que suministran estas herramientas indican que constituyen el sistema ideal de calibración para cumplir con la norma ISO 9000, y de hecho lo son, puesto que alcanzan una precisión del orden de $\pm 0,05\%$.

Aparentemente, la implantación de la norma ISO 9002 parece sencilla, pero no es una tarea fácil. Es necesario que el equipo de calibración esté certificado por un organismo reconocido, que dicho equipo se calibre periódicamente así como los instrumentos de medición y control afectados, que se identifiquen perfectamente los instrumentos, se entrene al personal y que todo ello esté perfectamente documentado.

Supone una mentalidad totalmente nueva dentro de la empresa englobando a todos sus departamentos y personal y contando con su convencimiento y con su aportación individual. Si no es así, será difícil conseguir una implantación adecuada.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

7. PRACTICAS INDUSTRIALES.

7.1. Esquemas Típicos de Control.

Instrumentos para el control de calderas.

La producción de calor fue uno de los primeros pasos en el campo de la técnica. Fue la utilización del vapor como fuerza motriz lo que hizo posible la revolución industrial del siglo XVIII.

Controles necesarios en las calderas de vapor.

1. Secuencia de encendido.
2. Nivel de agua de alimentación.
3. Control de la llama.
4. Control de la presión.
5. Temperatura del combustible.
6. Temperatura de los gases de salida.
7. Total de sólidos disueltos

Secuencia de encendido

Es el orden de operaciones que debe realizar la caldera para su encendido. El equipo llamado programador es el encargado de establecer la secuencia y los tiempos de trabajo. Se incrementa el uso de autómatas programables.

Nivel de agua de alimentación.

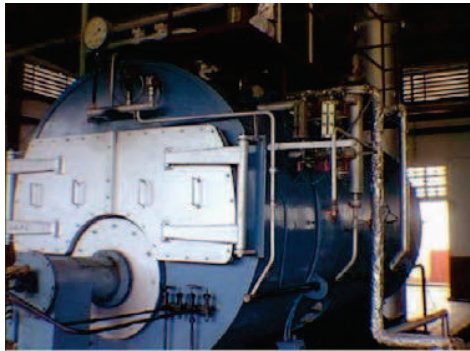
Este control mantiene el nivel de agua por encima de los tubos fluxes. Para una mayor seguridad las calderas están provistas de las siguientes indicaciones y protecciones.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

- ✚ Nivel normal de trabajo.
- ✚ Bajo nivel.
- ✚ Extra bajo nivel (Caudal peligroso).

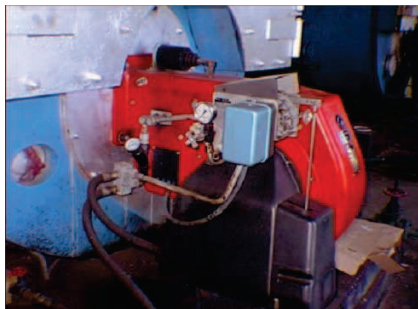
Instrumentos para controlar el nivel.

- ✚ Medidor capacitivo.
- ✚ Medidor ultrasónico.



Control de la llama.

La fotocelda es la encargada de chequear que la llama este presente, si detecta un fallo desconecta la caldera, indicando mediante una señal de alarma lo ocurrido. Esto evita que se acumule en el hogar de la caldera combustible, pudiendo provocar explosiones peligrosas en su interior.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Control de la presión.

Se emplean:

- ✚ Los presostatos de ajuste fijo y modulación.
- ✚ Transmisores de presión.

Presóstato para la seguridad.

Si la presión llega a la que ha sido ajustada en el presóstato, la caldera se para provocando una señal de alarma.

Presóstato para el arranque y parada.

Se fijan los valores de presión mínimo y máximo de trabajo de la caldera para su normal funcionamiento.

Presóstato para fuego alto.

En las calderas de dos pasos, es el encargado de conectar la segunda llama para incrementar el fuego, dependiendo de la presión a la cual ha sido ajustado.

Presóstato de modulación.

La salida continua de este presóstato es conectada al modulador, el cual se encarga de establecer la correcta relación aire -combustible, para mantener la presión en los valores prefijados.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

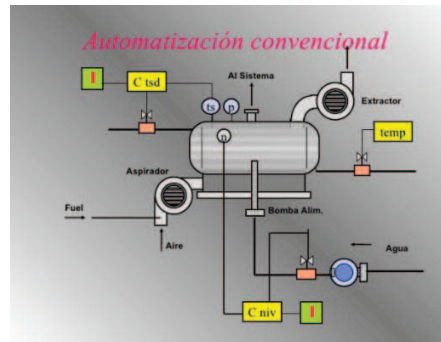
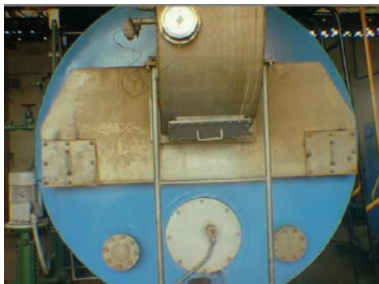
Temperatura del combustible.

El termostato es el encargado de que la caldera no comience su funcionamiento hasta que el combustible no haya alcanzado la temperatura necesaria para establecer una correcta atomización. Utilizado en las calderas de fuel oil.

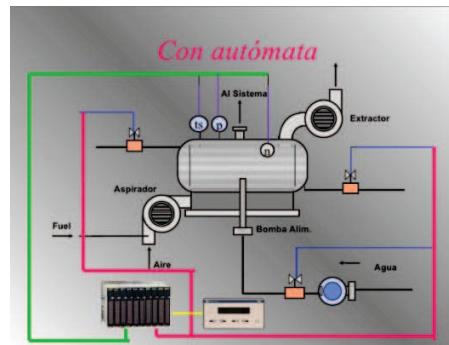


Temperatura de salida de los gases.

Se puede observar la temperatura de los gases mediante el termómetro que debe conectarse en la chimenea. Esto indica la eficiencia de la caldera, cuando la temperatura de los gases es muy alta es una manifestación de que la caldera está sucia o incrustada.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO



Calderas de fluido Térmico.

Controles necesarios en las calderas de fluido térmico

- ✚ Nivel visual depósito de recogida.
- ✚ Pirómetro de temperatura del fluido térmico y de humos en la chimenea.
- ✚ Nivel eléctrico de mínima en depósito de expansión.
- ✚ Manómetros de entrada y salida de la caldera y tomas de temperatura.
- ✚ Presóstato diferencial.
- ✚ Presóstato de máxima.
- ✚ Control de llama.

Nivel visual depósito de recogida.

Permite observar la cantidad de fluido de la instalación.

Pirómetro de temperatura máxima del fluido térmico.

- ✚ Previene sobre un posible fallo de varios elementos que pueda conllevar un aumento elevado de la temperatura del fluido térmico.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

✚ Elemento de seguridad que bloquea el quemador.

Pirómetro de temperatura de humos en la chimenea.

Detecta un aumento considerable de la temperatura de los humos. Bloquea el quemador.

Pirómetros de primera y segunda llama (pirómetro de trabajo).

Envían información (temperatura) al cuadro eléctrico sobre las demandas de calor del equipo.

Manómetros de entrada y salida.

Indican la presión en la entrada y salida de la caldera.

Presóstato diferencial.

✚ Detecta una mala circulación del fluido térmico, por insuficiente presión.

✚ Bloquea el quemador

Presóstato de máxima.

✚ Detecta una mala circulación del fluido térmico por aumento de la presión.

✚ Bloquea el quemador.

Control de la llama.

Mediante la célula ultravioleta, detecta luz, informando sobre falsos encendidos.

Programador.

Elemento que indica las secuencias que debe seguir el quemador.

Electro válvula de primera y segunda llama.

Dan paso a mayor o menor cantidad de combustibles.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Electro válvula de seguridad.

Cierra el paso si no hay demanda de combustible.

Causas más frecuentes de averías.

Quemadores

El quemador no enciende.

- ✚ Cadena de emergencia abierta.
- ✚ Conexión equivocada.
- ✚ Valor insuficiente de la tensión de la red de alimentación.

El quemador arranca pero no se enciende y luego se bloquea.

- ✚ No hay chispa en los electrodos.
- ✚ La chispa no inflama el petróleo.
- ✚ Pulverización irregular.
- ✚ No hay petróleo en el depósito.
- ✚ Tubería de suministro obstruida.
- ✚ Bomba de petróleo defectuosa.

El quemador arranca y se enciende pero luego se bloquea.

- ✚ Celda fotoeléctrica sucia o defectuosa.
- ✚ Celda mal colocada.
- ✚ Cable defectuoso.
- ✚ Exceso de agua en el combustible.
- ✚ Conexiones sueltas.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Pequeña llama chispeante.

- ✚ Boquilla parcialmente bloqueada.
- ✚ Exceso de aire.

Llama humeante.

- ✚ Presión del combustible demasiada alta.
- ✚ Suministro de aire insuficiente.

Baja presión de petróleo.

- ✚ Válvula reguladora de presión desajustada.
- ✚ La válvula reguladora se pegó.

Alta presión de petróleo.

- ✚ Válvula reguladora de presión desajustada.
- ✚ Obstrucción en la tubería de retorno de petróleo al depósito de almacenaje.

El quemador no cambia a llama alta o a baja llama.

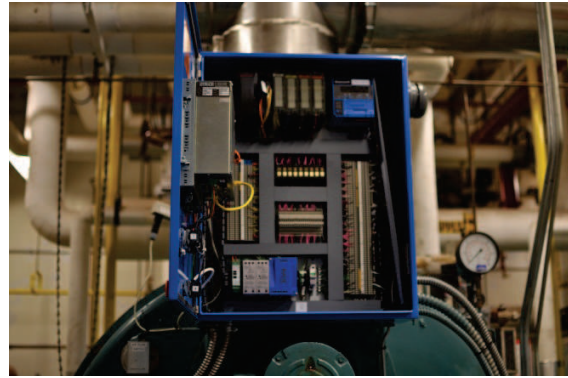
- ✚ Válvula magnética de alta/baja no se abre.
- ✚ Ajuste inadecuado del presóstato.

El quemador se conecta/desconecta continuamente

- ✚ Control de presión defectuoso.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Panel de Eficiencia de Combustión DELPHI (Honeywell) Modelo Yp900A1004U.



El panel de eficiencia de combustión Delphi, integra control de protección de flama, control de la relación de aire/combustible, ajuste de O_2 , control de variador de frecuencia (VFD) y control proporcional integral derivativo (PID), en un solo panel integrado precableado con una pantalla táctil de PC para brindar una fácil y cómoda puesta en funcionamiento.

Características.

- ✚ Funciona con una variedad de quemadores y calderas.
- ✚ Componentes alojados en un panel integrado para salvaguardar el control y la relación de combustible/aire con ajuste de oxígeno.
- ✚ Ajuste de oxígeno, ajuste de aire de combustión variable.
- ✚ Capacidad de control de variador de frecuencia.
- ✚ Interfaz touch mejorada.
- ✚ Actuadores disponibles desde 100 hasta 400 lb-pulg.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

- ✚ Software de monitoreo, para puesta en marcha, control y seguimiento.
- ✚ Control de salvaguardia de llama integrado y control de relación aire/combustible linkegeless con guarnición de oxígeno.
- ✚ Incluye la alta exactitud O₂, el sensor con la respuesta rápida y calibración de aire libre.
- ✚ VPS (sistema de Válvula de prueba) a través de la capacidad de control de llama.
- ✚ Actuador y canales de VFD con retroalimentación.
- ✚ La tasa de disparo/ control de carga, a través de temperatura, presión o la operación manual.
- ✚ 24 Vcc. panel de control industrial.

Especificaciones del producto.

Dimensiones (pulgadas) : 30 pulgadas de alto, 24 pulgadas de ancho y 10.5 pulgadas de interior.

Peso (kg) : 36.3 kg.

Frecuencia : 50Hz y 60Hz.

Rango de humedad (% HR): Máxima humedad relativa del 90% sin condensación.

Voltaje : 120Vac.

Vibración : 0.0 a 0.5 g continuos.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Programador para el control de calderas. Modelo EC7830A (Honeywell).



Descripción.

Microprocesador integral para el control del quemador, para aplicaciones de modulación completa. Proporciona la secuenciación automática del quemador, supervisión de llama, indicación del estado del sistema o autodiagnóstico y resolución de problemas.

Características.

- ✚ Comprobaciones de acceso para tensión eléctrica externa.
- ✚ Capacidad de interfaz de comunicación y flexibilidad de aplicación.
- ✚ Cinco LED proporcionan información de la secuencia.
- ✚ Cinco funciones interruptor Run /Test.
- ✚ Intercambiables amplificadores plug-in.
- ✚ Anunciación remota o local información de operación y falla (opcional).
- ✚ Memoria no volátil, conserva archivos de historial y estudio de bloqueo, después de pérdida de potencia.
- ✚ Compatible con detectores de llama de Honeywell existentes.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Especificaciones del producto.

Aplicación : Control de programación de llama.

Dimensiones : 127mm de ancho por 127 mm de alto por 133mm de profundidad con sub-base Q7800A x 155 mm de profundidad con base de Q7800B.

Peso (kg) : 0.7kg.

Comentarios : Quemador de energía con set on/off.

Frecuencia : 60Hz ($\pm 10\%$), 50hz.

Voltaje : 220-240 Vca ($\pm 10, -15\%$).

Envío y almacenamiento, rango de temperatura (°C) : -40°C hasta 60°C.

Establecimiento del periodo de llama piloto : 3 segundos a 5 segundos.

Establecimiento del periodo de llama principal : 3 segundos a -5 segundos, o intermitente.

Enclavamientos : Bloqueado.

Pre-ignición : Si.

Pre-purga : Determinado por la tarjeta de temporizador de purga ST7800A.

Post-purga : 2 segundos.

Componentes necesarios : Q7800A, B sub-bases de cableado universales.

R7849, R7861 Amplificador de señal de llama.

ST7800A plug-in de purga, tarjeta temporizador.

Control de flujo de aire : Seleccionable por el usuario.

Válvula piloto de segunda etapa : Intermitente.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Piloto experimental : Interrumpido.

Vibración : 0.5 entorno de g.

Q7800A, 22-Terminal B

Sub-base de cableado universal.



Aplicación

El Q7800A, B es una sub - base de cableado universal para la 7800 Módulos de relé de serie y anunciador expandido (S7830A). La sub - base de cableado universal proporciona terminales para el cableado de campo. Terminales de hoja de cuchillo en la 7800 Módulo de relés de la serie o S7830A activar el Q7800 bifurcado contactos para hacer las conexiones eléctricas. La sub-base de Q7800A1005 (cara 2) está disponible para aplicaciones del panel de montaje. El Q7800B1003 y Q7800B1011 (4 lados) sub-bases están disponibles para quemador o aplicaciones de montaje de pared. Se suministran troqueles en la parte posterior, superior e inferior para las conexiones del conducto.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Especificaciones.

PESO

Q7800A : 7 onzas.

Q7800B : 1 libra, 3 onzas.

GABINETE : NEMA 1.

ACCESORIOS : Cubiertas de ranura de acceso eléctrico, parte no. 221779 (Q7800B).

R7849A 1015/U Amplificador de llama UV.



Resumen.

Amplificadores de estado sólido plug-in que responden a entradas de detector para indicar la presencia de llama cuando se usa con la 7800 serie de llama modular con relé.

Características.

- ✚ Tiempos de respuesta de fallos de llama: 0.8 a 3.0 segundos.
- ✚ Rangos de fuerza señal de flama: 0.0 a 5.0 Vcc.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

- ✚ Enchufar en el módulo de relé 7800 a través de un conector de borde de tablero de circuito impreso afinado para la orientación correcta.
- ✚ Señal de flama, de tomas de prueba para medir voltajes, amplificador de la señal de llama.
- ✚ Módulo de bloqueos hacia afuera en la parada de seguridad con la falla del sistema de detención de llama.

Especificaciones del producto.

Tiempo de respuesta de fallo de llama (Seg.)	: 0.8 a o 1.0 segundos.
Peso (g)	: 71 g.
Tipo	: Ultravioleta.
Autocontrol	: Ninguno.
Uso con el control primario de seguridad	: 7800 serie módulos de relé.
Uso con el sensor de llama	: Gas, aceite C7027A, C70035A.

Modutrol. Motor para control de rata de llama. Modelo M7284Q1106/U.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Resumen.

Serie 72 Modutrol IV son motores de retorno, no resorte usados para controlar las válvulas y reguladores, los motores reciben una señal de corriente o tensión de un controlador electrónico, colocación de un regulador o la válvula en cualquier punto entre abierto o cerrado.

Características.

- ✚ Vuelta de resorte integral devuelve al motor a la posición normal en el caso de que la energía falle.
- ✚ Caja integral proporciona protección contra la intemperie NEMA 3. Si el motor está montado en posición vertical.
- ✚ Motor y circuitos funcionan desde 24 Vca.
- ✚ Terminales de conexión rápida, adaptador de terminal de tornillo, está disponible.
- ✚ Soporte adaptador para altura de eje coincidente de motores mayores, está disponible.
- ✚ Los motores tienen movimientos ajustables de campo (90 a 160 grados).
- ✚ Integrales interruptores auxiliares están disponibles.
- ✚ Motores de retorno pueden operar los vínculos de la válvula del extremo de la energía a los ejes auxiliares finales, para normalmente cerrado o normalmente abierto, aplicaciones de válvula.
- ✚ Todos los modelos tiene dobles ejes (ranurado y roscado en ambos extremos).
- ✚ Todos los modelos tienen levas del interruptor auxiliar.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

- ✚ Par fijo en todo el rango de tensión.
- ✚ Los motores están disponibles con ajustes de (zero) y (span).
- ✚ Modelos disponibles con la señal de entrada de 4 a 20mA.
- ✚ Modelos disponibles con la señal de entrada de 2 a 10Vcc.
- ✚ Carcasa de aluminio fundido al troquel.

Especificaciones del producto.

Aplicaciones	: Eléctrica.
Dimensiones (mm)	: 164mm de alto por 140 mm de ancho y 185 mm de interior.
Peso (lb)	: 7.5 lb.
Comentario	: Zero y Span ajustables para aplicaciones de gama.
Montaje	: Pie- montado.
Frecuencia	: 50-60Hz.
Conexiones Eléctricas	: Terminales de tornillo.
Tensión de alimentación	: 24V.
Consumo de energía	: 15VA.
Rango de temperatura ambiente (°C)	: -40°C a 60°C.
Interruptor auxiliar interno	: 2
Clasificaciones del interruptor auxiliar:	AFL 120Vca y 7.2 A. ALR 120 Vca y 43.2 A.
Dimensiones del eje (in)	: 0.375 in.
Señal de control	: Modulación de 4-20mA.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Fail Safe Mode	: Vuelta de reverso ninguna.
Par rating (lb-in)	: 150lb-in.
Grado de esfuerzo de torsión (Nm)	: 17Nm.
Interruptores auxiliares externos disponibles:	Si.
Rotación de eje (sobre el aumento de la señal de control):	Hacia la derecha (como visto desde el extremo de alimentación) (Normalmente cerrado).
Ajuste de carrera de fábrica	: 90° grados.
Sincronización nominal	: 30 -60 segundos.
Dimensiones de eje (mm)	: 10mm cuadrado.
Ejes de motor	: Terminales de doble eje.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Controlador Universal UDC (Honeywell).



Resumen.

El controlador digital UDC2500 es una adición nueva, de bajo costo. Este controlador presenta una nueva característica de confiabilidad, rentabilidad y simplicidad, controla temperatura y otras aplicaciones tales como:

Hornos, cámaras de medio ambiente, maquinaria de envasado, máquinas de procesamiento de plástico.

Características del producto.

- ✚ Entrada universal.
- ✚ Exactitud de 0.25%.
- ✚ Tasa de detección rápida (166mseg).
- ✚ Hasta 5 salidas análogas y Digitales.

Tipos.

- ✚ 2 Entradas digitales MODBUS y Comunicaciones Ethernet.
- ✚ Configuración infrarroja y pocket PC.
- ✚ Multilenguaje.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

✚ ¼ Tamaño DIN.

Modelos de límite.

Las características estándar incluyen Accutune III, con una sencilla pantalla táctil, dual de modo automático/manual, incluye la función de límite. Entre sus características incluyen, alimentación de corriente alterna comunicación RS422/485 modbus, RTU o Ethernet 10 Base-T TCP/IP protocolo de comunicación industrial.

Entradas analógicas.

El UDC 2500 tiene dos entradas analógicas con una precisión típica de $\pm 0.25\%$ a gran escala y una resolución típica de 16 bits. Son dos entradas analógicas muestreadas seis veces por segundo (cada 166m segundos). La primera entrada acepta termopares, RTD, mA, y tipos de tensión. La segunda entrada es un tipo de nivel alto, y puede usarse como un punto de consigna remoto, para adquisición de datos o como un parámetro de alarma. Esta entrada acepta rangos de 0-5V, 1-5V, 0-20mA o 4-20mA.

Entradas digitales.

Se proporcionan dos entradas digitales aisladas para el cierre de contacto seco remoto y tiene las siguientes acciones.

- ✚ Modo de control manual.
- ✚ Set- point locales.
- ✚ Acción de controlador directo.
- ✚ Programa externo de reset.
- ✚ Se puede desactivar la acción integral del PID.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

- ✚ Tiene modo manual- salida a prueba de fallos.
- ✚ Temporizador de inicio.

Control.

El controlador puede detectar:

- ✚ Corriente de salida (4-20 o 0-20 mA).
- ✚ Relés electromecánicos (5 Amperios.)
- ✚ Relés de estado sólido (1 Amperios).
- ✚ Relés electromecánicos duales (2 Amperios).
- ✚ Salida de colector abierto para algoritmos de salida.
- ✚ Tiempo proporcional On/Off o salida proporcional de tiempo (relé).
- ✚ Capacidad de calor/frío, proporciona Split o control de gama con PID independiente.

Control de algoritmos, dependiendo de la salida de algoritmos especificados, el controlador puede configurarse para los diferentes tipos tales como:

- ✚ On /Off.
- ✚ PID-A.
- ✚ PID-B-
- ✚ PD con rearme.
- ✚ Control de posición tres, el algoritmo TPSC permite el control de una válvula (u otro actuador), con un motor eléctrico impulsado por dos relés de salida del

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

controlador, uno para mover el motor, y el otro para reducir sin una retroalimentación.

Display S7999 para el control link, configuración y motorización de sistema de caldera.



Resumen.

Soporta hasta 99 sistemas de quemadores a través de Modbus, cada control de relación aire/combustible se puede ver individualmente su estado.

Características.

- ✚ Color de 4.6 X 3.5 pulgadas, interfaz de usuario en la pantalla touch.
- ✚ Montaje al ras.
- ✚ Dos puertos de comunicación RS485.
- ✚ Protector de pantalla, control de contraste y volumen.
- ✚ Permite nombres de terminal programable expandido.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Especificaciones del producto.

Gama de humedad (%RH) : 85% RH continuo, no condensado.

Voltaje : 12 Vcc. Entrada, 500 mA máximo pico de corriente.

Rango de temperatura de almacenamiento y envío (°C): -25°C a 60°C.

Termóstato digital (Honeywell) T6861.

Especificaciones del producto.

Aplicación : 2-4 Tubos.

Montaje : Horizontal en la caja de empalmes de 86 x 86 mm.

Frecuencia : 50 – 60 Hz.

Rango de Humedad (%RH) : 5 -90%.

Tensión de Alimentación : 120 Vca

Posiciones del Interruptor (Sistema): Heat –Off – Cool.

Rango de Temperatura de ajuste : 10°C a 32°C.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Válvula Reductora de presión Estándar con bridas D15P.



Válvula reductora de presión con asiento equilibrado, D15 protegen las instalaciones de agua contra la presión excesiva de la red de suministro, se evita el daño por sobrepresión y se reduce el consumo de agua. La presión establecida se mantiene constante incluso cuando hay una amplia fluctuación en la presión de entrada. La reducción en la presión de funcionamiento y el mantenimiento a un nivel constante minimiza el ruido en la instalación.

Especificaciones del producto.

Medio: Agua, aire comprimido y nitrógeno.

Material del cuerpo: Fundición GG25.

Material de la tapa del muelle: Metal.

Acabado del cuerpo: Capa de material sintético.

Tipo de conexión: Bridas.

Temperatura máxima: 70°C.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Presión estática: PN16.

Diseño con asiento equilibrado: Si.

Información adicional:

Tornillo de ajuste que no se eleva, para fijar la presión de salida e indicador de presión en la tapa del muelle.

El muelle de ajuste no está en contacto con el agua potable.

Con manómetro a la entrada y a la salida (DN 50- DN 150) o con manómetro en la salida (DN 200).

Con protección superficial interna y externa, el recubrimiento empleado no presenta toxicidad.

Las presiones para 600 psi (41.3 bar), temperaturas de 800 °F (426°C).

Diseño compacto: Disco de acero inoxidable endurecido, es la única parte móvil.

Barato: Bajo costo inicial, es menos costoso que las tecnologías existentes, y se puede reparar.

Rugoso: Maneja el martillo de agua y el sobrecalentamiento.

Confiable y de eficiente operación: Por medio de la descarga ayuda a eliminar la acumulación de suciedad y proporciona un cierre apretado.

Resistente al punto de congelación: Autodrenaje, diseño que evita la congelación.

Toda la construcción es de acero inoxidable. Resistente a la corrosión interna y externa.

Fácil de controlar: Ciclo de descarga audible, simplifica la operación de comprobación.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Aplicaciones.

- ✚ Seguimiento de vapor.
- ✚ Goteo y distribución de líquidos.
- ✚ Calefacción.

Operación.

Entrante flujo de aire y condensado a través del cuerpo de la trampa y en la cámara de control. La línea de presión provoca, que el disco del asiento, permita la descarga completa. Cuando destella aumenta la velocidad del flujo, creando una baja presión debajo del disco. El condensado de parpadeo en alta velocidad golpea el interior de la pared de la cámara del disco y se desvía a la parte superior del disco causando una acumulación de presión. El disco es impulsado hacia abajo sobre el asiento por este desequilibrio de presión. La trampa permanece cerrada como vapor en la guarda de la cámara de control. La presión dentro de la tapa no se baja hasta que se condensa el vapor atrapado, debido a la radiación del cuerpo. La condensación del vapor reduce la presión sobre el disco. El disco a continuación, se levanta y repite el ciclo.

Especificación.

La trampa de vapor está diseñada termodinámicamente. El órgano del cuerpo es de construcción de acero inoxidable endurecido. El asiento de la válvula será integral al cuerpo. La cubierta se junta sin empaques o sellos. La trampa es conveniente para presiones entre 600 PSI y disponible en 3/8" a 1".

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Condiciones de funcionamiento máximas.

- ✚ Presión máxima de operación : 600 Psi (41.3 bar).
- ✚ Temperatura máxima de funcionamiento : 800 °F (426°C)

Sensor de llama C7012, Autocontrol Ultravioleta.



Resumen.

Detectores de llama electrónica de estado sólido, que se usan con controles de salvaguardia y amplificadores de llama.

Características.

- ✚ Proporcionar una conexión eléctrica de rápida instalación de conducto roscado y codificados por colores.
- ✚ Posee una carcasa a prueba de explosiones para uso en atmósferas peligrosas con una ventana de visualización de 100 psi.

Especificaciones del producto.

Aplicación : Gas, o quemadores de petróleo o carbón.

Rango de temperatura ambiente (°C): -20°C a 79°C.

Especificaciones Eléctricas : 120 Vca.

Frecuencia : 60 Hz.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

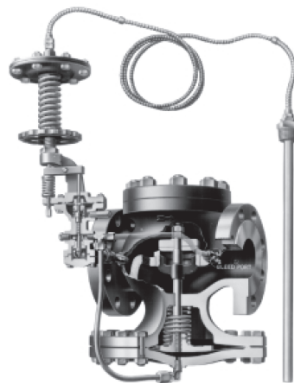
Consumo de energía : 7.0W.

Dimensiones (mm) : 133 mm de diámetro (incluye brida de montaje) x 183 mm de largo.

Peso (kg) : 1.9 kg.

Válvulas reguladoras de temperatura.

Regulador de temperatura - Presión. Tipo T 134 de Fundición de Hierro o Acero.



TYPE ET124 TEMPERATURE & PRESSURE REGULATOR

Datos de Aplicación.

- ✚ Calentadores instantáneos.
- ✚ Calentadores de Almacenamiento.
- ✚ Calentadores de aceite.
- ✚ Calefacción de baño.
- ✚ Calentadores de procesos.
- ✚ Cubas.
- ✚ Secadores.

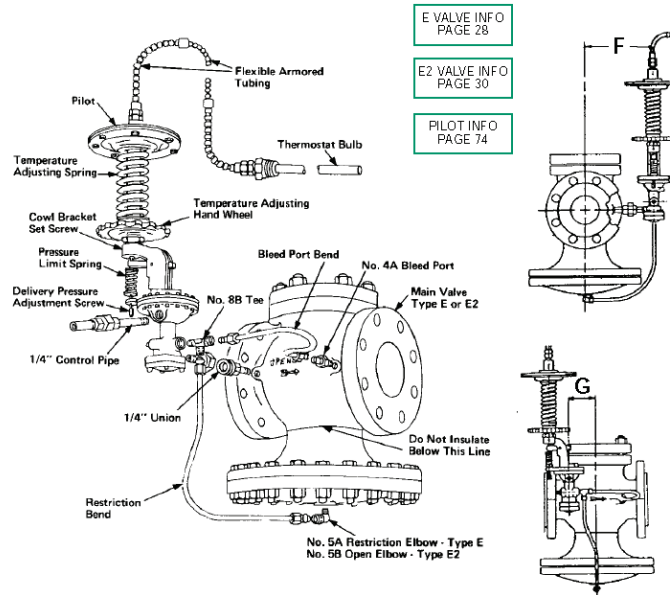
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

✚ Hornos.

✚ Soporta presiones hasta 20 psi.

Dimensiones (mm)

Size	F	G	
		E	E2
3/8 (10)	5 3/8 (136)	1 1/4 (32)	-
1/2 (15)	5 3/8 (136)	1 1/4 (32)	-
3/4 (20)	5 3/4 (146)	1 3/8 (35)	1 3/8 (35)
1 (25)	6 1/4 (152)	1 1/2 (38)	1 1/2 (38)

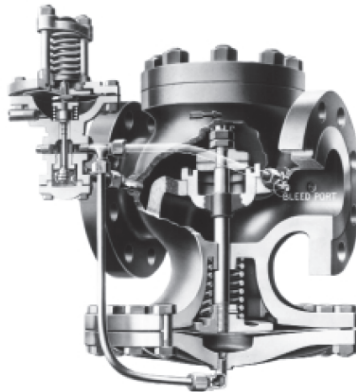


CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Válvulas reguladoras de temperatura.

Tipo Ed Serie. Regulador de presión de Fundición de Hierro o Acero.

Soporta presiones de 600 PSI a 750°F.



TYPE ED PRESSURE REGULATOR

Datos de aplicación.

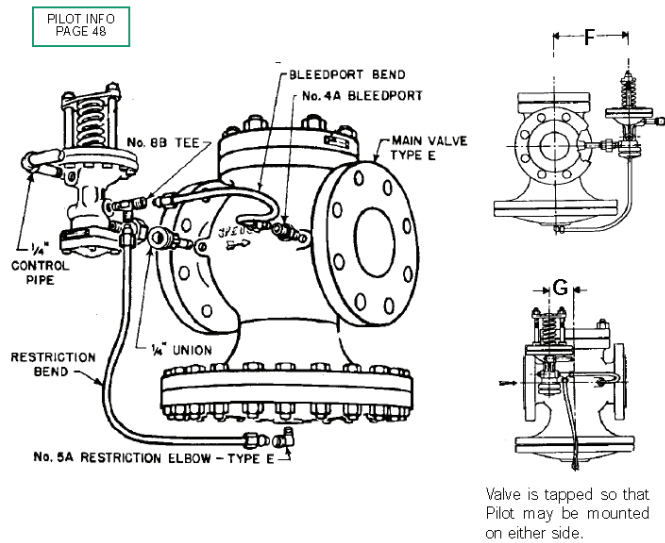
- ✚ Regulación para la distribución del vapor de la presión.
- ✚ Punto único o múltiples usos.
- ✚ Control de presión para plantas de vapor.
- ✚ Sistemas de calefacción.
- ✚ Reducción paralela.

Dimensiones (mm).

Size	F	G
3/8 (10)	5 3/8 (136)	1 1/4 (32)
1/2 (15)	5 3/8 (136)	1 1/4 (32)
3/4	5 3/4	1 3/8

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

(20)	(136)	(35)
1	5 3/4	1 1/2
(25)	(146)	(38)



Manómetro con glicerina. Modelo BR201L Blue Ribbon



Parte inferior conectado, llena de líquido. Nuestra línea 200 series, es una línea de alta calidad de medidores llenos de líquido. El relleno de glicerina, ayuda a amortiguar los efectos de la vibración que extenderá la vida del medidor. Este indicador se utiliza

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

normalmente en el sistema hidráulico y neumático, así como cualquier pieza mojada no corrosiva para el latón y bronce, donde el relleno de glicerina es conveniente para su uso.

Especificaciones:

Tamaños de disco disponibles : 1 ½ ", 2", 2 ½ ", 4".

Tamaños de conexión disponibles : 1/8" (m) NPT 1 ½ " y 2 ".

Cajas de acero inoxidable y de bisel.

Conexiones de Latón internas.

Tubo bourdon de bronce de fósforo.

Llenado de líquido (disponible en seco).

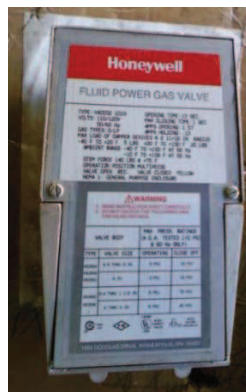
Precisión : 1 ½ " y 2" dial = 2%, 2 ½ " dial= 1.6%.

Doble escala : Psi y Bar.

Temperatura ambiente : Lleno de 30°F a 160°F.

Seco -30°F a 180°F.

Actuador Modelo V4055 (HONEYWELL).



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

V4055E1016 On – Off con Actuador.

Prueba de cierre utilizados normalmente en los cuerpos de las válvulas V5055C/V5907C (Alta presión).

Visión de conjunto.

Cuerpos de las válvulas V5055C/V5907C, utilizadas para controlar el suministro de gas a quemadores industriales y comerciales.

Características.

- ✚ Utilizado donde se emite luz suave.
- ✚ Un segundo tiempo de cierre máximo.
- ✚ Continuamente se muestra la posición de la válvula con un indicador de color rojo cuando está abierto y un indicador de color amarillo cuando está cerrado.
- ✚ Montaje en cualquier posición directamente al cabezal de la válvula con tres tornillos de fijación.

Especificaciones generales.

- ✚ Descripción On – Off con actuador, la prueba de cierre se emplean habitualmente en cuerpos de válvula de alta presión.
- ✚ Damper Shaft.
- ✚ Tiempo de cierre < 1 segundo.
- ✚ Tiempo de apertura 13 segundos.
- ✚ Voltaje 120 Vca.
- ✚ Frecuencia 60 Hz.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

- ✚ Interno de detector auxiliar.
- ✚ Presión máxima de funcionamiento seguro (Psi) 15 a 25 Psi.
- ✚ Presión máxima de funcionamiento seguro (kPa) 103 a 172 Kpa.
- ✚ Rango de temperatura (F) -40 °F a 150 °F.
- ✚ Rango de temperatura (C) -40 °C a 66 °C.

7.2 Calderas de vapor.

Las calderas de vapor se utilizan en la mayoría de industrias debido a que muchos procesos emplean grandes cantidades de vapor. La caldera se caracteriza por una capacidad nominal de producción de vapor en t/h a una presión especificada y con una capacidad adicional de caudal en puntas de consumo de la fábrica.

A la caldera se le exige, pues, mantener una presión de trabajo constante para la gran diversidad de caudales de consumo en la factoría, por lo cual debe ser capaz de:

- a) Aportar una energía calorífica suficiente en la combustión del fuel-oil o del gas con el aire.
- b) Desde el punto de vista de seguridad, el nivel debe estar controlado y mantenido dentro de unos límites.
- c) Es necesario garantizar una llama segura en la combustión.
- d) El sistema de control debe ser seguro en la puesta en marcha, en la operación y en el paro de la caldera.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

- e) El funcionamiento de la caldera debe ser optimizado para lograr una rentabilidad y economía adecuadas, lo cuales posible con un control digital y/o distribuido que permite optimizar la combustión (ahorros de 2 a 10 % en combustible) y ganar en seguridad.

7.2.1 Control de combustión.

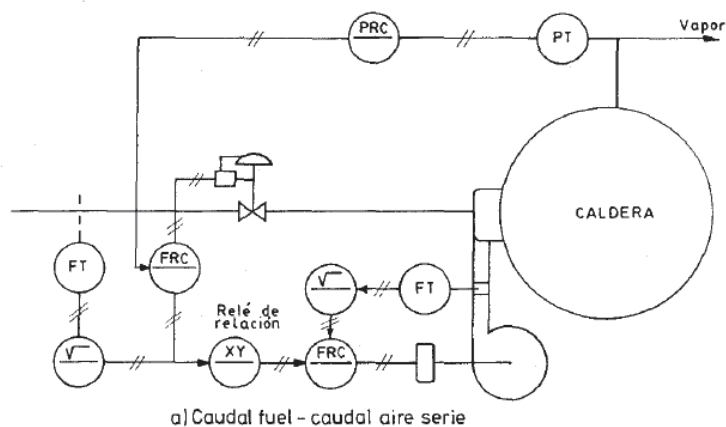
La regulación de la combustión se basa en mantener constante la presión de vapor en la caldera, tomándose sus variaciones como una medida de la diferencia entre el calor tomado de la caldera como vapor y el calor suministrado. El controlador de la presión de vapor ajusta la válvula de control de combustible. La señal procedente del caudal de aire es modificada por un relé de relación para ajustar la relación entre el aire y el combustible, y pasa a un controlador que la compara con la señal de caudal de combustible. Si la proporción no es correcta, se emite una señal al servomotor de mando del ventilador o a la válvula de mariposa, de modo que el caudal de aire es ajustado hasta que la relación combustible-aire es correcta. En la regulación de la combustión puede darse preferencia en el mando al combustible o al aire para que la operación de la caldera corresponda a un sistema determinado de variadas características de seguridad. Estas características de combustión son las siguientes:

- Caudal fuel - caudal aire en serie.
- Caudal aire - caudal fuel en serie.
- Presión de vapor - caudal fuel/caudal vapor - caudal aire en serie.
- Caudal aire - caudal fuel en paralelo.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

➤ Caudal fuel - caudal aire en serie.

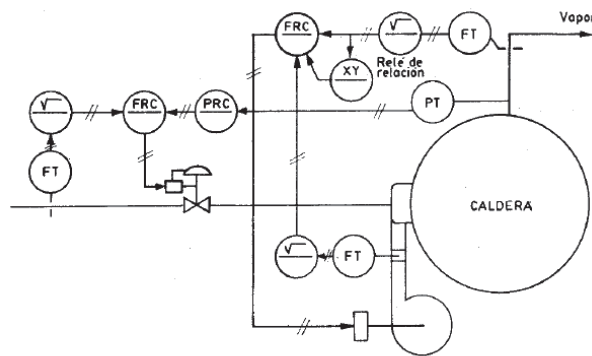
En el primer esquema de funcionamiento que puede verse en la figura 7.1 a, el controlador de presión ajusta el punto de consigna del controlador de caudal de fuel y esta variable actúa a través del relé de relación fuel-aire, como punto de consigna del controlador de aire. Como las variaciones del caudal de fuel influyen lentamente en la señal de presión de vapor, el controlador “maestro” se ajusta para una respuesta rápida ante cambios en la presión.



En esta disposición si varía la presión del vapor, el caudal de fuel cambia antes que el del aire de combustión. Si se limita el caudal de fuel, lógicamente quedará también limitado el caudal de aire. La desventaja principal del sistema es el riesgo de explosión que se presenta ante un fallo de aire en el punto de consigna del controlador de caudal de aire; si así ocurre no hay aire de combustión pero el fuel continua circulando.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

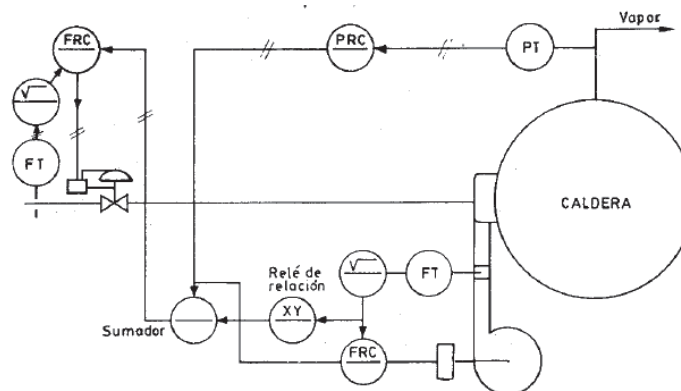
de presión de vapor ajusta el controlador de caudal de fuel. El transmisor de caudal de vapor ajusta el controlador de caudal de aire al sistema de control de combustión. Aunque las variaciones de caudal de vapor sean rápidas las fluctuaciones que experimenta no lo son tanto como la presión de la línea de vapor principal. Este sistema se emplea con preferencia en calderas de carbón pulverizado.



c) Presión de vapor-caudal fuel serie
Caudal vapor - caudal aire serie

Caudal aire - caudal fuel en paralelo.

La ventaja principal de este sistema, que puede verse en la figura 7.1 d, es su control directo en el fuel y en el aire. De hecho, para mantener una relación correcta fuel-aire conviene incorporar al sistema un relé de relación manual.



d) Caudal aire-caudal fuel en paralelo

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

7.2.2 Control de nivel.

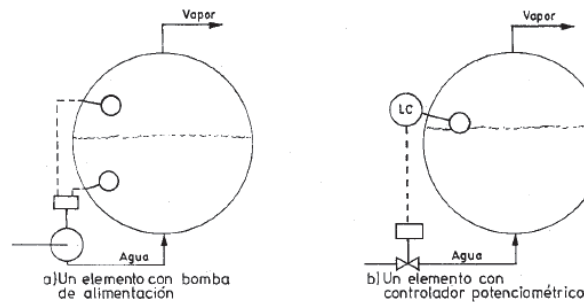
La regulación del agua de alimentación que establece el nivel de la caldera depende de múltiples factores, del tipo de caldera, de la carga, del tipo de bomba y del control de presión del agua de alimentación. El sistema de control del agua de alimentación puede realizarse de acuerdo con la capacidad de producción de la caldera, según la tabla 9.1 que figura a continuación y que el lector debe tomar sólo como guía de selección teniendo presente que cada caso individual debe estudiarse separadamente.

Tipo	Variables	Capacidad de la Caldera, kg/h		
		<6000	6000-15000	>15000
Un elemento	Nivel	Cargas Irregulares	Pequeños cambios de carga	Cargas mantenidas
Dos elementos	Nivel Caudal de Vapor	Cargas irregulares con grandes fluctuaciones	Cambios de carga moderados	Lentos cambios de carga moderados
Tres elementos	Nivel Caudal de vapor Caudal de Agua.			>20000

En la regulación de nivel de un elemento representada en la figura 7.2 c el único instrumento utilizado es el controlador de nivel que actúa sobre la válvula del agua de alimentación. El instrumento medidor de nivel puede ser del tipo desplazamiento o de presión diferencial de diafragma. En calderas de pequeña capacidad, inferior a 1000 kg/h, la regulación puede ser todo-nada, con dos alarmas de nivel alto y bajo que ponen en marcha la bomba de alimentación del agua (fig. 7.2 a).

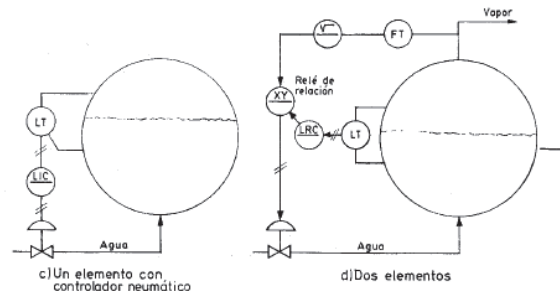
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

En calderas de capacidad media, del orden de 2000-4000 kg/h, puede utilizarse un controlador de flotador con un reóstato acoplado eléctricamente a una válvula motorizada eléctrica. Este conjunto (fig. 7.2 b) actúa como un control proporcional con punto de consigna el punto medio del campo de medida del nivel de flotador. La regulación de nivel de dos elementos se logra con un controlador de caudal de vapor y un controlador de nivel cuyas señales de salida se comparan en un relé de relación que actúa directamente sobre la válvula de control del agua de alimentación.



En la figura 7.2 d puede verse este sistema de control. 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.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO



La regulación de tres elementos elimina el fenómeno de oscilación del nivel de agua 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 una vaporización rápida que fuerza la producción de burbujas y 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. 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.

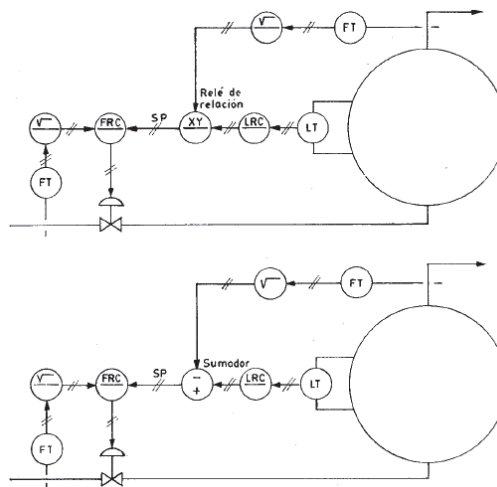
Las tres variables que intervienen en el sistema son:

- ✚ Caudal de vapor.
- ✚ Caudal de alimentación de agua.
- ✚ Nivel de agua.

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 de la caldera). Manteniendo estas

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

funciones en las tres variables, los instrumentos correspondientes pueden estar relacionados entre sí de varias formas. Las más representativas se encuentran en la figura 7.2 e en las que una señal anticipativa (feedforward) del caudal de vapor, se superpone al control de nivel, y todas tienen 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 en el nivel. Señalemos que la medida del caudal de vapor se efectúa preferentemente con una tobera porque su forma suave evita la erosión que de otra forma se produciría en una placa-orificio por causa de las gotas de agua que inevitablemente arrastra el vapor.



El caudal de agua de alimentación puede medirse a través de una placa-orificio o de una tobera.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

7.2.3 Seguridad de llama.

Exceptuando las calderas de muy pequeña capacidad, el elemento detector utilizado universalmente es el ultravioleta por la gran seguridad que ofrece. El relé de llama conectado al detector puede adoptar muchas formas, desde la más sencilla alarma y paro de la caldera hasta realizar funciones de:

- ✚ Pre-barrido, es decir, limpieza de los gases que pueden haberse acumulado desde la última combustión.
- ✚ Encendido de la llama piloto.
- ✚ Encendido de la llama principal.
- ✚ Paro de la instalación según un enclavamiento secuencial en el que intervienen los elementos: fallo de llama, presóstato de baja presión de fuel o gas, alarma de nivel de la caldera, etc.
- ✚ Post-barrido, fase en la que se limpian los gases quemados.

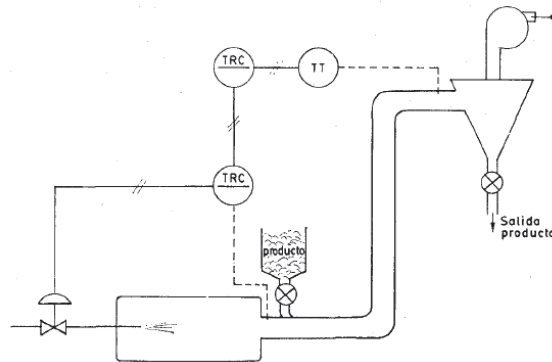
El circuito de llama (detector + relé) dispone además de una comprobación de su propio circuito en el arranque de la caldera, lo cual es suficiente en las industrias que paran una vez a la semana. Si el proceso es continuo y la caldera debe trabajar sin paros durante períodos prolongados, aumenta el riesgo de coincidencia entre el fallo del sistema de seguridad y la presencia de grandes cantidades de combustible sin quemar. Se recomienda utilizar un detector ultravioleta que permite autocomprobar cada segundo el circuito electrónico del sistema de llama. Se consigue mediante una placa que corta

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

periódicamente la radiación de la llama hacia el detector, momento en el cual se auto comprueba el circuito. Cualquier fallo detectado hace parar la instalación.

7.2.4 Secaderos y evaporadores.

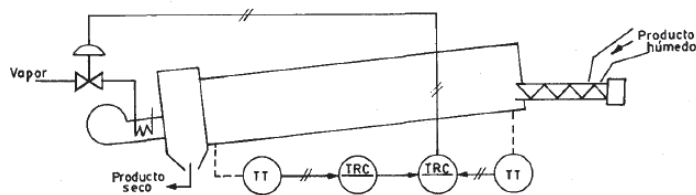
Los secaderos tienen por objeto obtener el producto sólido con poca humedad, mientras que los evaporadores concentran el producto en forma líquida al evaporar el agua. Entre los diversos modelos de secaderos se encuentra el secadero continuo de evaporación rápida (flash) que transporta el producto en una corriente de aire caliente y en muy poco tiempo disminuye su humedad hasta el valor final. Como es difícil medir directamente la humedad del producto en forma continua se controla en su lugar la temperatura variable que depende indirectamente de la humedad. En la figura 9.3 se encuentra un esquema de este secadero con los instrumentos de control correspondientes.



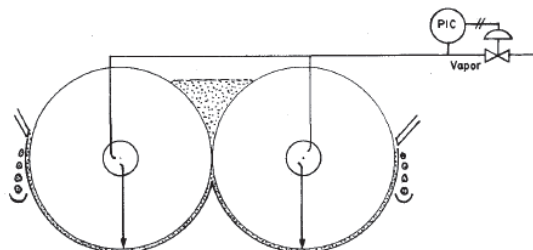
El producto en forma de polvo húmedo entra en el circuito después del horno y se seca durante el recorrido por el tubo vertical. El control suele ser en cascada, siendo la variable primaria la temperatura de salida y la variable secundaria la temperatura después del horno. El control es normalmente PID. El quemador del horno tiene controles

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

auxiliares, tales como vigilancia de llama, válvula auto - reguladora de presión para inyectar vapor al fuel-oil y pulverizado, válvula de solenoide con rearme manual para cerrar el paso del combustible, presostatos y termostatos para alarma de máxima y mínima presión y de temperatura. El conjunto forma parte del circuito de enclavamiento de la instalación. Otro tipo de secador es el rotativo, que consiste en un cilindro de gran longitud en cuya entrada se introduce el producto húmedo y a cuyo través circula aire caliente. En la figura 7.4 puede verse un esquema del control del proceso observándose que, análogamente al secadero de evaporación rápida, el control suele ser en cascada PID.



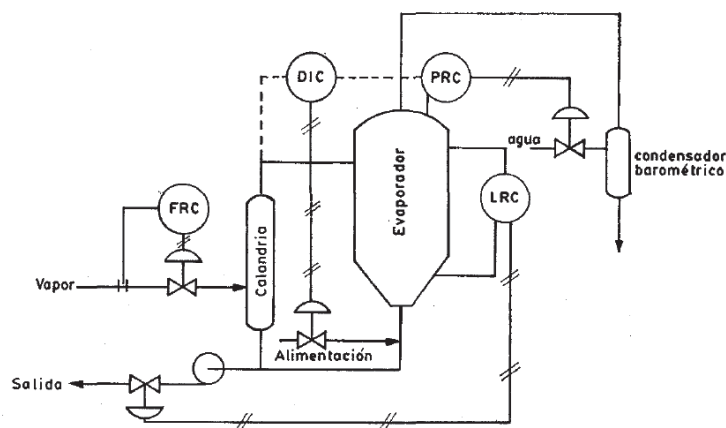
Otro tipo de secador es el de doble cilindro rotativo, representado en la figura 9.5, que fue uno de los primeros sistemas que se empleó para secar. Consiste en dos cilindros rotativos calentados con vapor que giran en sentidos opuestos hacia adentro muy poco separados y arrastrando una película del producto.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Los cilindros se cargan con producto que se seca en el corto espacio existente en el rodillo hasta una cuchilla que lo arranca y cae en un transportador. El único control automático que se aplica es la regulación de presión de vapor. Los evaporadores existen en muchos tamaños, formas y tipos. El evaporador discontinuo es de producción forzosamente limitada por la necesidad de las operaciones de llenado y de vaciado. En cambio, el evaporador continuo tiene una producción más regular. Según el número de veces que la solución es calentada por la fuente de calor se tienen varios tipos: evaporador de simple efecto, de doble efecto y de triple efecto e incluso de más efectos si bien los más comunes son los dos últimos).

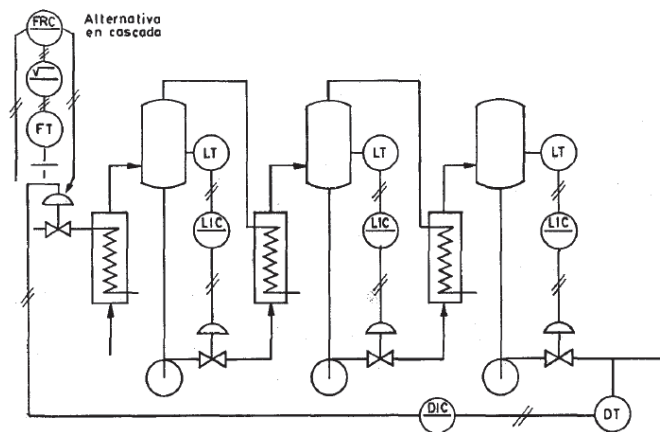
En la figura 7.6 se representa un evaporador de un solo efecto. Se establece un caudal fijo de vapor a la calandria, se controla el nivel del evaporador variando la entrada del producto, y se regula la concentración midiendo la elevación del punto de ebullición, es decir, la diferencia de temperaturas entre el líquido en ebullición en el evaporador y el condensado a la misma presión absoluta, y actuando sobre la salida del producto.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Otras formas de medir la concentración están basadas en la conductividad, en la presión diferencial y en la radiación gamma, pero excepto este último tienen el problema de lo posible obturación del elemento. Se controla asimismo la presión absoluta en el cuerpo del evaporador, actuando sobre la entrada de aire o bien sobre la entrada del agua que va al condensador barométrico en caso de utilizar este sistema para generar el vacío.

En la figura 7.7 puede verse la regulación de un triple efecto. Excepto el primer efecto, los otros dos se calientan con el vapor del producto generado en el efecto anterior. Debido a su gran capacidad y a la lentitud con que se establecen nuevas condiciones en el proceso, el sistema de control se escoge de modo que se mantengan condiciones fijas y se disminuyan al mínimo los efectos de cambios de carga exteriores al proceso. Los instrumentos de control son similares a los del evaporador de un solo efecto.



7.2.5. Horno túnel.

Los instrumentos de regulación y control forman parte integral de los equipos de proceso de la industria cerámica y en particular constituyen una necesidad en el proceso de

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

cocción de los productos cerámicos realizado en un horno túnel. Los procesos de cocción del bizcocho y del bizcocho recubierto de esmalte se basan en el mantenimiento de una curva de cocción que establece un programa preciso de temperatura distribuida de acuerdo con las tres zonas típicas del horno: precalentamiento, cocción y enfriamiento. La carga es transportada en vagonetas a una velocidad determinada y las temperaturas se regulan básicamente en la zona de cocción donde se encuentran situados los quemadores de combustible y los valores deseados en la zona de precalentamiento se alcanzan mediante la circulación de aire caliente procedente de la zona de enfriamiento. Estas temperaturas corresponden a las zonas del horno, ya que salvo casos muy especiales, es difícil medir directamente la temperatura de las piezas. De todos modos, debido al tiempo que las piezas pasan dentro del horno puede admitirse que en la última zona, donde no absorben prácticamente calorías, su temperatura es muy próxima a la de las paredes. La medida de la temperatura se efectúa con termopares de cromel - alumel o de platino platino-rodio, según sean las temperaturas alcanzadas y con fundas cerámicas de mullita sílice-alumínica o de aluminio recristalizado (nótese que las temperaturas máximas de trabajo de los termopares de cromel-alumel y platino platino-rodio son de 950 - 1200°C y de 1400°C, respectivamente).

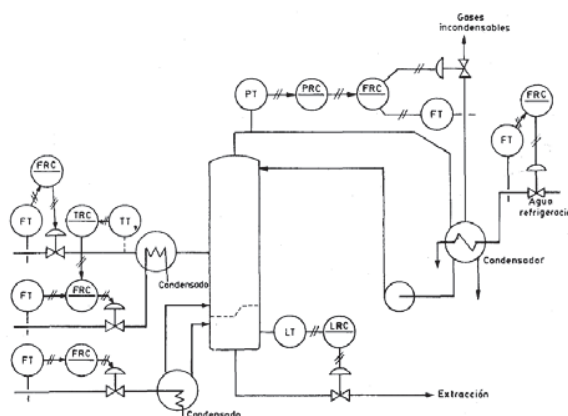
Los reguladores actúan o bien sobre una válvula de solenoide, o bien sobre válvulas neumáticas. La zona de cocción puede dividirse en varias zonas de control y cada una suele estar regulada independientemente por un regulador todo-nada, o flotante, o bien por un regulador proporcional o proporcional + integral o proporcional + integral +

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

derivativo. En el horno túnel es también importante la regulación del tiro al mantener una distribución uniforme de temperaturas en cada sección del horno. Las dos tomas del controlador de tiro se conectan en lados opuestos en la entrada o salida de la zona de encendido que es la posición que usualmente da los mejores resultados. El controlador actúa sobre el ventilador de salida del aire manteniendo así el tiro deseado.

7.2.6 Columnas de destilación.

La operación de destilación consiste en separar una mezcla por diferencia de composición entre un líquido y su vapor. Esta operación se realiza en forma continua en las denominadas columnas o torres de destilación donde por un lado asciende el vapor del líquido hasta salir por la cabeza de la columna y por el otro va descendiendo el líquido hasta llegar a la base. En estos pasos tiene lugar una mezcla entre las dos fases, de tal modo que pueden efectuarse extracciones a distintos niveles de la columna para obtener productos más o menos pesados. Los problemas de la destilación son muy diversos, por lo cual los tipos de columnas lo son también.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Las variables importantes que regulan el funcionamiento de la columna son la presión en la cabeza de la columna, el caudal, la composición y la temperatura de la alimentación, el calor añadido y las calorías extraídas y los caudales de destilado y de producto extraídos en la base. La presión en la columna se regula mediante un controlador de presión en cascada con un controlador de caudal de los gases incondensables que escapan del condensador, si bien también podría efectuarse con el regulador de presión actuando directamente sobre la válvula de gases incondensables. El caudal de la alimentación se regula con un controlador de caudal que mantiene un caudal constante, gracias a una banda proporcional bastante estrecha (alta ganancia). La composición de la alimentación tiene una gran importancia en el funcionamiento de la columna. Sin embargo, es difícil ajustar esta composición de modo que es necesario actuar sobre la columna cuando se presentan cambios en la composición de la alimentación. Entre los analizadores, el cromatógrafo es el más utilizado. La temperatura de la alimentación es también importante. Al objeto de controlarla se emplea un intercambiador de calor con vapor. La temperatura se regula en cascada con el caudal del vapor. El calor añadido en la columna se efectúa a través de un intercambiador de calor instalado en la base o en un plato intermedio de la columna. Un controlador de caudal de vapor ajusta estas calorías aportadas. Como complemento se instala un controlador de nivel en la base de la columna que lo ajusta mediante una válvula de control que actúa sobre la extracción. Las calorías extraídas tienen lugar en el condensador de los gases que salen de la cabeza de la columna. Un controlador de caudal de agua de refrigeración del condensador ajusta estas

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

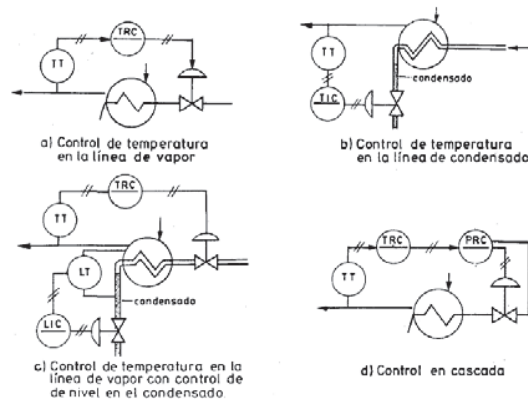
calorías. El caudal de destilado se ajusta mediante un controlador de nivel del condensador, en cascada con un controlador de caudal en la extracción. El caudal de producto extraído en la base está relacionado con el calor añadido en la columna y tal como se ha indicado está regulado indirectamente por el controlador de nivel de la base de la columna. Es obvio que las variables que influyen en el funcionamiento de la columna de destilación son muy diversas y que cada una de ellas, si varía, actúa como una perturbación en todo el proceso, por lo cual existen formas variadas de control, derivadas de la estudiada, que cada vez son más complejas, siendo la última la optimización mediante computador que se aplica siempre que los estudios económicos así lo aconsejen.

7.2.7 Intercambiadores de calor.

La gran mayoría de los procesos industriales emplean intercambiadores de calor en operaciones tales como precalentamiento, pasteurización, esterilización y refrigeración, entre otras. Existen varios sistemas para el control de los intercambiadores de calor debido a que son muchos los factores que deben considerarse: la presión del vapor o del fluido de alimentación, las fluctuaciones en el caudal del producto, las variaciones en la temperatura del producto, en su calor específico, los retardos del proceso, etc.

En la figura 9.10 a puede verse un esquema de control simple con un controlador de temperatura que actúa directamente sobre la válvula de vapor.

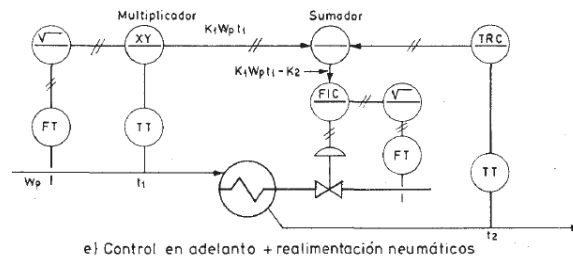
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO



En otro sistema (fig. 7.10 b) se regula la extracción de condensado, es decir, indirectamente el nivel de condensado en el serpentín de vapor, mediante un controlador de temperatura del producto que manda una válvula de control en la línea de salida del condensado. Como ventajas, el sistema ofrece con relación al anterior la eliminación de los problemas de purga del condensado al mantenerse constante la presión de vapor dentro del serpentín y el empleo de una válvula de control más pequeña. Sin embargo, el control óptimo de temperatura deja mucho que desear ya que si disminuye el caudal del producto, el controlador de temperatura manda cerrar la válvula y el serpentín tarda cierto tiempo en llenarse del condensado del vapor con el resultado de una considerable lentitud en la respuesta del sistema para acomodarse a las nuevas condiciones. En cambio, lo contrario, es decir, el aumento del caudal del producto tiene una respuesta rápida ya que al abrirse la válvula de control, el serpentín se vacía rápidamente. Una variante del sistema anterior que se aplica cuando la presión del condensado es baja y

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

existen problemas en su eliminación, es la sustitución del purgador clásico del condensado por un control de nivel del condensado (fig. 7.10 c).



La temperatura del producto continúa siendo regulada por un controlador convencional actuando sobre la válvula de vapor.

Otro sistema es el control en cascada (fig. 7.10 d) entre el controlador de temperatura como primario y un controlador de presión de vapor como secundario. De este modo, las variaciones de presión del vapor de la línea de alimentación son corregidas inmediatamente por el controlador de presión secundario y el controlador de temperatura primario se encarga de compensar las variaciones de temperatura por otras causas.

El control en adelante (feedforward), combinado con el control clásico de realimentación, también puede aplicarse a un intercambiador de calor, en particular cuando su operación es crítica y se necesita un control estable con una recuperación rápida ante las perturbaciones, que compense el coste elevado de la instrumentación implicada. Idealmente, la ecuación que debe resolver continuamente el control en adelante es la:

$$W_v \times q_v = W_p c_e (t_2 - t_1)$$

En la que:

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

W_v = Caudal del vapor en peso (kg/h).

q_v = Calor de condensación del vapor.

W_p = Caudal del producto en peso (kg/h).

c_e = Calor específico del producto.

$t_2 t_1$ = Temperaturas del producto a la entrada y a la salida.

Respectivamente, prescindiendo del rendimiento del intercambiador.

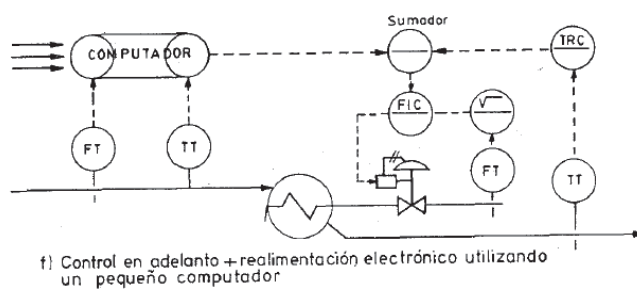
Esta ecuación puede transformarse a:

$$W_v \times q_v = W_p c_e t_2 - W_p c_e t_1$$

Es decir, en otros términos:

Posición válvula de control = $K_1 W_p t_1 - K_2$. Ya que t_2 , se mantiene constante.

De este modo, un instrumento multiplicador realiza la operación $K_1 W_p t_1$ y otro sumador le resta a esta señal la $W_p c_e t_2$ obtenida de la señal de temperatura t_2 combinándose así el control en adelanto y el de realimentación (fig. 7.10 e).

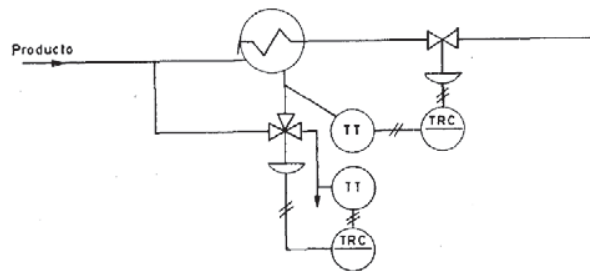


En la figura 7.10 f puede verse el mismo tipo de control pero utilizando un computador.

En los casos de intercambiadores de calor entre líquidos, es usual estabilizar la temperatura del líquido de calefacción o refrigeración en un sistema separado. Cuando el

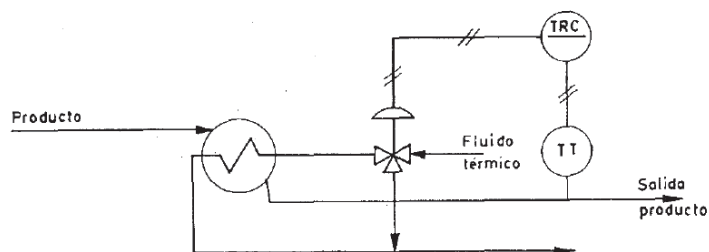
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

intercambiador de calor tiene una respuesta demasiado lenta, el mantenimiento de temperatura del producto se realiza con un controlador de temperatura actuando sobre una válvula de tres vías divisoras que deriva el intercambiador. De este modo se logra una respuesta rápida frente al empleo de una válvula de dos vías, ya que la capacidad térmica del intercambiador es grande e introduce un retardo considerable ante cambios en la carga. El producto es derivado y se mezcla directamente con el producto caliente que sale del intercambiador (figura 7.10 g). Una variante del control en derivación se aplica en los casos de intercambiadores de calor entre líquidos, donde es usual estabilizar la temperatura del líquido de calefacción o de refrigeración en un sistema separado.



g) Control en derivación del producto

En la figura 7.10 h puede verse el control de un intercambiador utilizando aceite térmico obtenido de un sistema separado. A este sistema podría aplicársele, si se deseara, un control en cascada con la temperatura del fluido térmico como variable secundaria.



h) Control en derivación del fluido de calefacción o de refrigeración

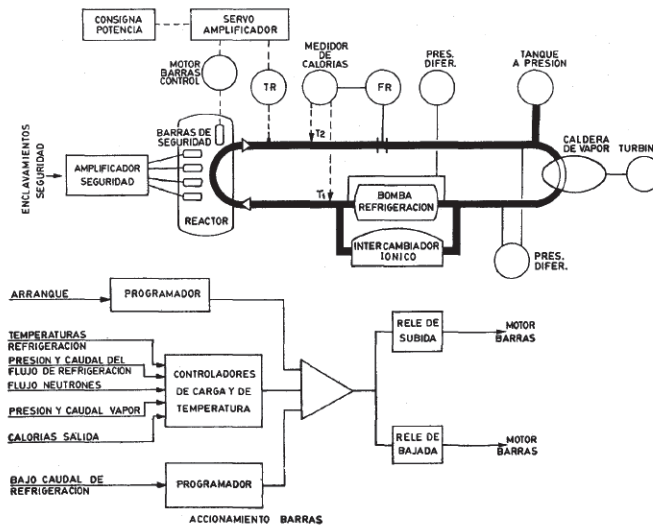
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

7.2.7 Control del reactor en una central nuclear.

En una central térmica convencional se utiliza una caldera de vapor con un quemador de fuel-oil o gas (o bien carbón). El calor generado se transfiere al agua de la caldera a través del haz de tubos dispuestos en el interior de la cámara de combustión. El agua se transforma en vapor que, sobrecalentado, pasa a la turbina, que a su vez mueve los generadores correspondientes. En la central nuclear, la función realizada por la caldera es sustituida por el reactor nuclear combinado con un sistema primario de refrigeración y generadores de vapor. En los dos sistemas, el control del agua en la caldera y el de la turbina es básicamente el mismo: control de nivel de tres elementos en la caldera y posición de las válvulas de admisión de la turbina para regular el caudal de vapor, y por lo tanto, la potencia de salida. Sin embargo, señalemos que desde un punto de vista simplificado, la caldera de la central térmica es compleja - la potencia de salida gobierna el caudal de combustible y el aire de combustión combinados en la mezcla adecuada, establece el número de quemadores a utilizar y en muchas plantas fija la temperatura de sobrecalentamiento mientras que la central nuclear es básicamente más simple sólo se requiere el control del consumo del combustible nuclear. La producción de la energía en el reactor nuclear se logra mediante la fisión de los átomos del material combustible por el bombardeo con neutrones. El número de éstos da una medida aproximada de la potencia de salida y para ajustarlo se posicionan adecuadamente las barras de control de reactividad. El sistema de control emplea como señales de entrada, el flujo de neutrones, las temperaturas, la presión y el caudal del fluido de refrigeración, la posición de las

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

barras de control y las calorías de salida de la planta. Un programa establece la carga a aplicar para alcanzar el nivel de potencia deseado, mediante los grupos de las barras de control. En la figura 7.11 puede verse un esquema simplificado del conjunto de los instrumentos utilizados. El núcleo del reactor contiene termopares de cromel – alumel y detectores móviles de neutrones que proporcionan datos de la distribución de temperaturas y del flujo, lo que permite determinar la distribución de potencia dentro del reactor y calibrar los detectores de flujo externos.



Otra diferencia entre el reactor nuclear y la central térmica es el sistema de paro de la central, ya sea planificado de antemano, ya sea en una emergencia. Mientras que en la central térmica convencional el paro se realiza de modo simple cerrando las líneas de fuel-oil o de gas y la emergencia puede ser debida a fallos de presión en la línea o de caudal de aire de combustión, en la central nuclear el paro puede presentarse por pérdida del caudal de refrigerante primario o aumento exagerado de la potencia de salida hasta un

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

nivel de inseguridad. El sistema de emergencia del reactor nuclear debe actuar rápidamente y debe ser de alta confiabilidad.

Los sistemas de seguridad del reactor tienen en cuenta los siguientes puntos:

- ✚ Aislamiento del sistema de contención mediante una válvula de bloqueo en cada línea que penetra en las paredes del reactor.
- ✚ Mantenimiento del sistema de barras de control y de seguridad en su posición.

Si el sistema falla por manipulación incorrecta o fallos del sistema de movimiento se produce una liberación de radiactividad que causa un gran desprendimiento de calor. Para eliminarlo, sea en caso de emergencia o bien en caso de paro programado, es necesario que la instrumentación inicie una refrigeración de emergencia, accionando rápidamente las barras de seguridad. La característica de velocidad de éstas es muy importante, y como detalle señalemos que efectúan su carrera completa en un poco más de medio segundo.

Los criterios establecidos para la seguridad de la central nuclear se basan en la confiabilidad y en la redundancia de los instrumentos. Se han redactado normas que establecen métodos para ensayar los contadores de radiactividad, los materiales eléctricos, los motores, los requerimientos de inspección, de instalación y ensayo de los instrumentos, la calificación sísmica y resistencia al calor de los mismos, en particular en el interior de la contención, los ensayos para la comprobación de fallos con el reactor en marcha mediante los sistemas redundantes de instrumentos, etc. El dispositivo de seguridad es excitado principalmente ante un fallo de alimentación de los instrumentos,

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

una temperatura alta en la refrigeración, un nivel de potencia de salida excesivo o un flujo elevado de neutrones. El sistema de arranque del reactor debe tener en cuenta la gama tan amplia de niveles de potencia que el reactor puede generar y debe realizar los siguientes puntos:

- ✚ Impedir que el grado de aumento del flujo de neutrones sea excesivamente rápido.
- ✚ Impedir que la reactividad exceda los límites máximos de proyecto dentro de la gama de potencias de trabajo.
- ✚ Mantener la adecuada generación de calor en respuesta a la demanda.
- ✚ La instrumentación no nuclear incluida en el bucle del agua de refrigeración primario del reactor contiene medidores de presión diferencial del núcleo del reactor y de la bomba de refrigeración, transmisores de temperatura y de presión, medidores de caudal de refrigerante, de temperatura diferencial, de calorías, etc.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

7.3. TRANSMISORES Y PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN INDUSTRIAL.

Configuración y Calibración del Transmisor de Presión diferencial Inteligente con protocolo HART-Hand Held.

Objetivo: Calibrar y Configurar parámetros del Transmisor de Presión Diferencial con Protocolo HART – Hand Held y verificar su funcionamiento.

Transmisor de Presión Diferencial Inteligente

Marca : FOXBORO

Modelo : IDP10 - T

Alimentación: 12.5 – 42 VDC



HAND HELD – Comunicador de Campo

Marca : EMERSON

Modelo : 375

Comunicación : HART



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Controlador y Registrador



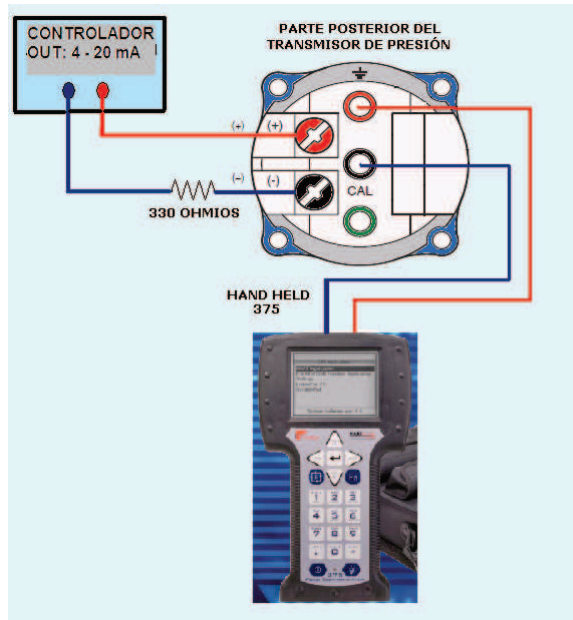
Herramientas y materiales:

- ✓ Destornillador plano
- ✓ Destornillador estrella
- ✓ Resistencia de 330 ohmios

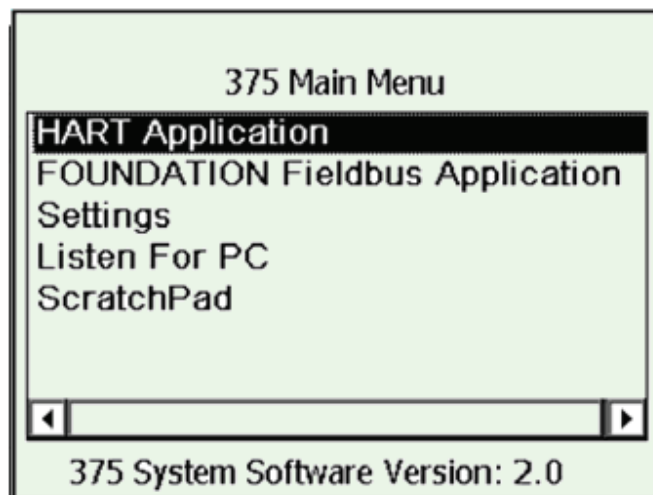
Pasos para la Calibración y Configuración del Transmisor de Presión Diferencial Inteligente.

1. Orden y Limpieza en el área de trabajo.
2. Equipos e instrumentos a utilizar
3. Verificar estado y operatividad de instrumentos y equipos a usar.
4. Se retira la tapa de protección del transmisor.
5. Realizar la conexión según esquema con el controlador, un resistor en serie (330 Ω) y el comunicador de campo.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO



1. Verificar la conexión y luego encender el Hand Held
2. Nos aparecerá un menú en el cual seleccionamos con el lápiz del Hand Held la opción : **HART Application**.

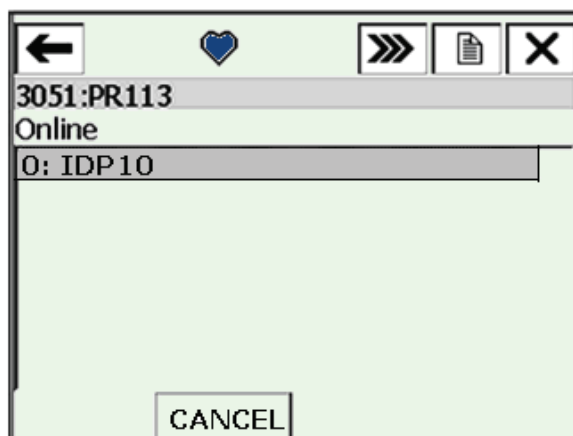


CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

3. Tendremos el siguiente menú en el cual elegiremos la opción: **En línea**

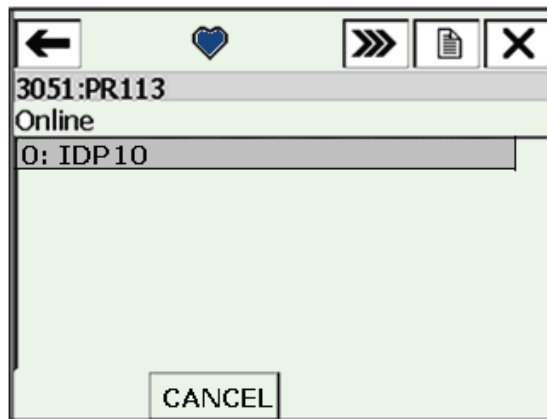
Fuera de línea	Compilacion de datos de configuración para despues descargarlo a un transmisor o Simulador con conexion en linea para un transmisor sin conexion con este
En línea	Configurar, Calibrar, y operar en línea el transmisor.
Transferencia	Transferencia de datos hacia el comunicador de transmisor o viceversa.
Frecuencia de dispositivo	Mostrar la frecuencia de salida (corriente)
Utilidad	Ajuste automático del contraste de la pantalla del comunicador.

1. Luego esperamos unos instantes hasta que el Hand held establezca comunicación con el dispositivo
2. Nos aparecerá el dispositivo al cual de daremos doble toque con el lápiz.
3. Tendremos el siguiente menú en el cual elegiremos la opción: **En línea**

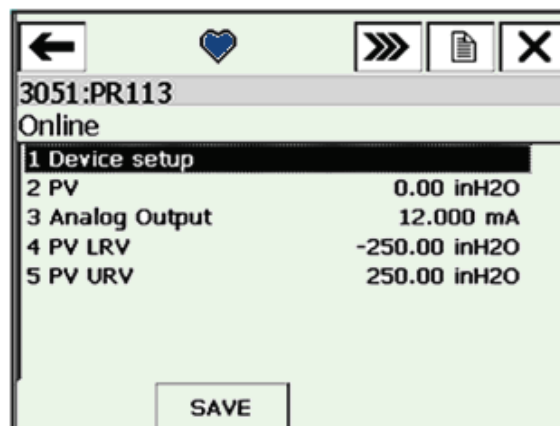


CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

4. Luego esperamos unos instantes hasta que el Hand Held establezca comunicación con el dispositivo.
5. Nos aparecerá el dispositivo al cual le daremos doble toque con el lápiz.



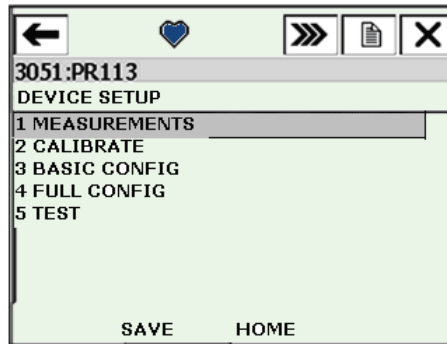
6. Enseguida tendremos el siguiente menú en el cual visualizamos algunos parámetros. Le damos doble toque con el lápiz a la opción: **Device Setup**



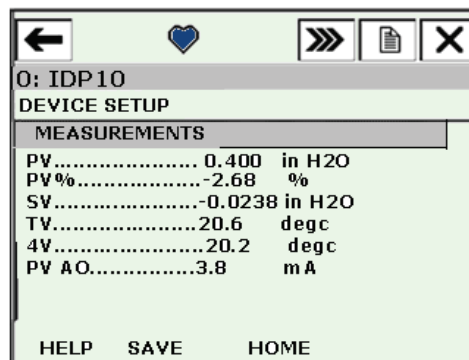
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

7. Nos aparecerá el siguiente menú y a continuación le daremos la opción:

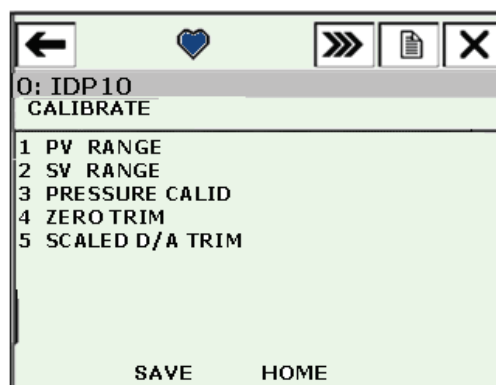
MEASSUREMENTS.



8. Nos aparecerá el siguiente cuadro.

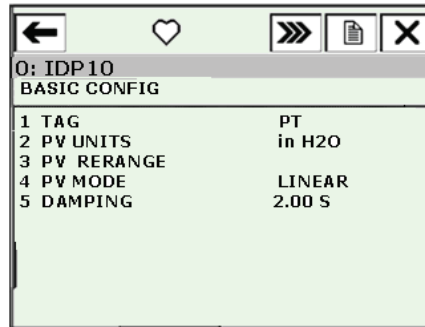


9. Si elegimos la opción **CALIBRATE** tendremos:

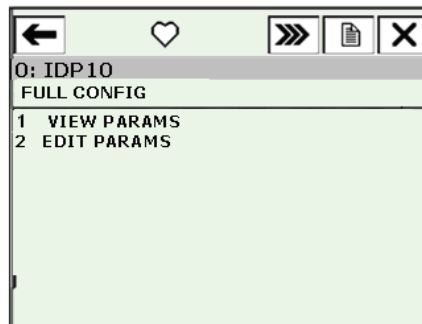


CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

10. Si elegimos la opción **BASIC CONFIG** tendremos



11. Si elegimos la Opción **FULL CONFIG** tendremos



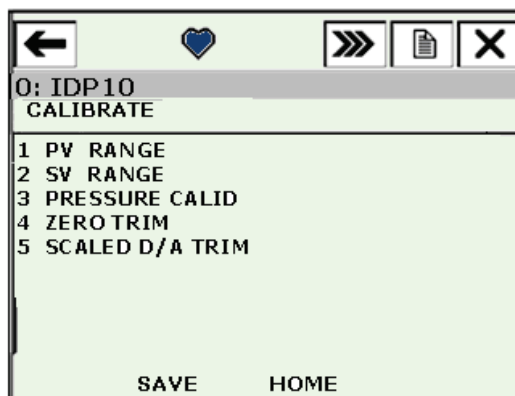
12. Con estas opciones podremos visualizar (**VIEW PARAMS**) y modificar (**EDIT PARAMS**) parámetros.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

13. Anotaremos los valores que están en la opción : **EDIT PARAMS**

1 Poll addr	0
2 Num resp preams	
3 Tag	
4 Descriptor	TRANS D
5 Date	TQ – ETANOL
6 Message	12/12/2008
7 PV Mode	PT
PV Sqrt Cut ^(a)	Linear
PV Units	inH2O
PV Offset ^(b) or PV Flow URV ^(c)	
Damp	0.00s
E Temp Fail	Non- Failed
AO Alm Typ	Hi
Extrn Zero	Enabled
SV Mode	Linear
SV Sqrt Cut ^(d)	
SV Units	Psi
SV Offset ^(b) or SV Flow URV ^(c)	0psi
Final asmbly num	1

14. Ahora que anotamos los valores de configuración inicial podemos cambiar las unidades de ingeniería (**inH2O**) y el **ZERO TRIM** para calibrar nuestro cero en cualquiera sea el nivel del tanque.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

15. Una vez q configuramos nuestro ahora configuramos nuestros **LRV** (Rango de Valor alto) y **URV** (Rango de valor Alto) dándole en la opción: **PV RANGE**.
16. Configuraremos nuestro rango bajo a 1 inH₂O (LRV) a 20 inH₂O (URV).
17. Subimos el nivel del tanque y verificamos que la corriente indicada en el Hand Held no varía de 3.8 mA hasta que el nivel alcanza el 1 inH₂O y este es el 0% del rango del cual va a partir con 4mA.
18. Esperamos hasta que el nivel alcance 20 inH₂O y debe de darnos 20 mA. Pasado este nivel la corriente no varía de 20 mA.
19. Luego de hacer esta prueba, cambiamos el **POLL ADDR** de **0** a **1**
20. A continuación verificamos en el menú **MEASSUREMENTS** que aunque el nivel varíe, la corriente siempre es de 4 mA.
21. Luego de realizar esta prueba cambiamos las unidades de ingeniería, calibramos el transmisor con un nuevo Zero Trim y configuramos diferentes rangos y con el Poll addr en 0.
22. Terminada la tarea se procede a desenergizar y desmontar el Lazo.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

7.4. Medidores de caudal y flujo.

Módulo de control de Nivel por Presión Diferencial.



CALIBRACION Y MANTENIMIENTO DE VALVULAS DE SEGURIDAD POR ALIVIO A RESORTE.

1. Objetivo.
2. Alcance.
3. Definiciones.
4. Actividades.
 - 4.1 Funcionamiento de las válvulas de seguridad por alivio.
 - 4.2 Instalación.
 - 4.3 Calibración de la presión de apertura (Blow-up).
 - 4.4 Calibración de la presión de recierre (Blow-Down).

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

4.5 Certificación de la capacidad de descarga.

4.6 Prueba de fugas de la válvula de seguridad.

4.7 Lapeado del disco obturador y asiento.

5. Equipos-Herramientas.

6. Aseguramiento de la Calidad.

7. Seguridad y Medio Ambiente.

1. OBJETIVO

Enumerar y describir las distintas tareas que deberán llevarse a cabo en la actividad de instalación, mantenimiento y calibración de válvulas de seguridad por alivio operadas a resorte.

2. ALCANCE.

Estas prácticas serán de aplicación para todas las válvulas de seguridad por alivio con pilotos diferenciales.

3. DEFINICIONES.

Válvula de seguridad por alivio: Dispositivo mecánico (válvula) de descarga automática, que tiene por función, mantener la presión de gas en un circuito, tanque o cañería dentro de un límite tope prefijado, eliminando el exceso de presión por venteo a la atmósfera a los fines de preservar la integridad estructural de los elementos, equipos y cañería de la instalación.

Presión de apertura o timbre: Presión a la cual la válvula inicia el primer soplido, comenzando a levantarse el obturador.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Presión de venteo o alivio: Presión a la cual la válvula se abre, rápida y completamente, evacuando sobre-presión del sistema.

Presión de cierre o bloqueo: Es la presión a la cual la válvula se bloquea totalmente, impidiendo el pasaje de gas a la atmósfera.

Recierre: Es la diferencia entre la presión de timbre y la presión de cierre de la válvula. Se indica en valor porcentual de la presión de timbre.

Presión de trabajo: Presión promedio a la cual opera normalmente el sistema.

Sobre presión: Es el valor en que se incrementa la presión desde el primer alivio hasta la presión de apertura, medida en forma porcentual respecto a la presión de trabajo.

Contra presión estática: Es la presión existente en el colector o recipiente de descarga, con válvula cerrada.

Contra presión dinámica: Es la presión del fluido a la salida de la válvula en el momento de la descarga.

4. ACTIVIDADES.

4.1 Funcionamiento de las válvulas de seguridad por alivio.

Cuando la fuerza ejercida por la presión del fluido supera la fuerza que ejerce el resorte sobre el disco obturador, este comienza a levantarse generando la primera etapa de apertura (**presión de Apertura o Timbre**), esta presión al levantar levemente el obturador incide en la superficie anular del obturador por lo que la fuerza se incrementa, determinando una inmediata apertura total de la válvula (Pop o Blow-Up) o segunda etapa de apertura (**presión de Alivio o Venteo**), una vez evacuada la sobre-presión el

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

obturador desciende sobre la tobera produciéndose el cierre de la válvula (Blow-Down) **(presión de Cierre o Re-cierre)**.

4.2. Instalación.

Tanto en el montaje como en el desmontaje deben tomarse las siguientes precauciones:

- I. Evitar los golpes y sacudidas para no dañar las caras de asiento de las bridas y para evitar que se desajusten las partes internas.
- II. En una línea o tanque presurizado, se debe despresurizar totalmente el sistema antes de proceder al montaje o desmontaje de la válvula.
- III. Se debe soplar (barrido) la línea en la cual será instalada la válvula, con el fin de eliminar residuos y cuerpos extraños que puedan dañar el conjunto de internos.
- IV. Antes del montaje, se debe limpiar bien los asientos de las bridas y conexiones roscadas.
- V. La válvula se debe instalar en posición vertical.
- VI. Los espárragos de las bridas, deben ser ajustados en forma uniforme y con el torque adecuado correspondiente a su sección.

4.3. Calibración de la presión de apertura (Blow-up).

1. Se puede realizar la calibración en línea, si el sistema lo permite.
2. Preferiblemente se realizará la calibración en un banco con un tanque de capacidad adecuada para la prueba.
3. Despresurizar la válvula, desmontarla del sistema y montarla sobre el tanque de prueba.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

4. Despresurizar la válvula (en caso de hacer la calibración en línea).
5. Retirar el capuchón y medir con calibre de profundidad la distancia entre el tope del tornillo de regulación y la parte superior de la contratuerca.
6. Aflojar la contratuerca y luego el tornillo de regulación, retirando el mismo que comprime el resorte.
7. Aflojar las tuercas y quitar la tapa de la válvula y desmontar con cuidado la guía del vástago, junto con el disco obturador levantando del vástago.
8. Limpiar todo el conjunto y superficies de contacto del obturador y la tobera.
9. En caso de que se necesite cambiar el asiento, quitar el tornillo de bloqueo del anillo de regulación y luego retirar el obturador.
10. Se deben reemplazar todas las partes blandas (Aro sellos o PTFE) y todas las juntas de la válvula y lubricar con grasa liviana, las partes móviles de la válvula, vástago y guía.
11. Proceder al armado en orden inverso al descripto.
12. Ajustar el tornillo de regulación que comprime el resorte al valor del punto V, y ajustar la contratuerca.
13. Comprobar que el alivio tenga lugar a la presión de calibración exigida, con una tolerancia de $\pm 0.14 \text{ Kg/cm}^2$ para presiones de calibración inferiores a 4.9 Kg/cm^2 y $\pm 3\%$ para presiones de calibración iguales o superiores a 4.9 Kg/cm^2 .
14. Evitar el disparo si no se posee un tanque de adecuada capacidad, para evitar que se dañe el asiento de la tobera.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

15. Regular el tornillo de calibración hasta obtener el valor deseado.
16. Para todas las comprobaciones de la presión de calibración, la contra-tuerca de bloqueo del tornillo, debe estar ajustada.
17. Bajar la presión, a un 75% de la presión de disparo antes de operar, para cada ensayo que se realice.

4.4. Calibración de la presión de recierre (Blow-Down).

Mediante el anillo de regulación se establece la variación porcentual entre la presión de venteo (Blow-Up) y la presión de re-cierre (Blow-Down).

En la posición de distancia mínima, entre el anillo y el disco obturador, se produce una rápida apertura, dado que la fuerza de empuje es mayor; produciéndose el cierre, cuando la presión ha bajado por debajo del límite prefijado.

En la posición de distancia máxima, entre el anillo y el disco obturador, la válvula encontrará dificultades para abrirse completamente, y el cierre se producirá en un valor muy cercano al de calibración.

Los valores aconsejables de regulación del anillo, son aquellos que se encuentran entre un 5 y un 8% del valor de presión prefijado, de calibración de apertura de la válvula.

Para corregir los valores de Re-Cierre (Blow-Down), es necesario:

- a) Aflojar el tornillo de bloqueo del anillo, para permitir la libre rotación del mismo.
- b) Girar el anillo en sentido contrario al de las agujas del reloj, para aumentar el disparo del cierre.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

- c) Girar el anillo en sentido al de las agujas del reloj, para disminuir el disparo del cierre.
- d) Ajustar el tornillo de bloqueo, reemplazando la junta correspondiente.
- e) Efectuar las pruebas necesarias hasta obtener el valor deseado.

Una vez calibrada la válvula, se la deberá hacer actuar al menos tres veces, a fin de verificar repetibilidad y registrar los valores de timbre, apertura y cierre.

4.5. Certificación de la capacidad de descarga (N.A.G.-100 – Sección 201).

1. Los dispositivos de seguridad marcados por el fabricante con una capacidad certificada (código ASME - sección VIII), podrán considerarse aptos para aliviar la capacidad que figura en el estampado. Se harán las correcciones necesarias para determinar la capacidad en las condiciones operativas reales.
2. Se podrán utilizar las capacidades enumeradas en la información publicada por el fabricante para identificar la capacidad del dispositivo en virtud de las condiciones establecidas.
3. Se aceptará la utilización de datos obtenidos de alguna otra forma, así como los calculados mediante fórmulas reconocidas.

4.6. Prueba de fugas de la válvula de seguridad.

1. Tapar la conexión de salida con un disco (espesor mínimo 3/8"), brida normalizada o tapón roscado, según corresponda, en cuyo centro llevará un tubo de $\varnothing 5/16"$ (7.94 mm), el mismo se sumergirá a una profundidad de 1/2" (12.7 mm) en una cubeta con agua.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

2. La prueba de estanqueidad (API Std. 527), consiste en elevar la presión de entrada a la válvula, de la presión de calibración, y comprobar el número de burbujas por minuto que se observa en la cubeta, valor el cual no debe superar lo indicado.
3. En caso que la pérdida fuera superior a lo indicado, se debe reparar el asiento, realizando un lapeado (esmerilado) del obturador, o bien remplazar las partes dañadas según se estime conveniente.

4.7. Lapeado (Esmerilado) del disco obturador y asiento.

1. Utilizar un trozo de hierro colado con una cara especular o bien un trozo de cristal de 1/2 " de espesor, de 30 x 30 cm de lado.
2. Apoyar el obturador sobre la superficie, previo haber puesto pasta esmeril, y describir la figura de un 8, cada tanto levantar el obturador para permitir que la pasta fluya hacia el centro, repitiendo la operación hasta tanto desaparezcan las marcas o ralladuras del obturador
3. Limpiar profundamente las piezas esmeriladas, eliminando todo resto de la pasta utilizada.

5. EQUIPOS-HERRAMIENTAS

- ✚ Vehículo para transporte del banco de calibración y/o batería de tubos de nitrógeno.
- ✚ Hidro-grúa / Grúa para desmontaje de válvulas de diámetros mayores.
- ✚ Caja con herramientas de mano.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

- ✚ Grasa liviana, pasta esmeril, desengrasante no combustible, trapos, etc.
- ✚ Cristal para esmerilado.
- ✚ Kit de repuestos y juntas para reparación de válvulas de alivio.
- ✚ Manómetros patrones, clase 0.1, de rango adecuado, con certificado rastreable a patrón nacional o internacional reconocido como tal.

6. ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

La Zona deberá contar con los Certificados de Calibraciones y Habilitaciones de equipos e instrumentos empleados para desarrollar las tareas o mediciones: Incluye a todo el instrumental y/o equipos que sea instalado y/o utilizado en el desarrollo de la actividad, con trazabilidad rastreable a patrón nacional o internacional reconocido como tal.

10. SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE

10.1. Para la ejecución de los trabajos descritos, se deberán tomar estrictamente todas las medidas de seguridad establecidas en él:

"Manual de Seguridad y Prevención de Accidentes de TGN" (SM SP M 01)

10.2. A fin de mantener el control del sistema de transporte y garantizar la seguridad de las personas involucradas, se deberá comunicar al controlador de turno de Control de Gas, todo ingreso, actividad desarrollada, tiempo estimado de tareas y egreso de las instalaciones de TGN.

10.3. Luego de realizada las actividades programadas, el lugar de trabajo deberá quedar completamente limpio.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Calibración.

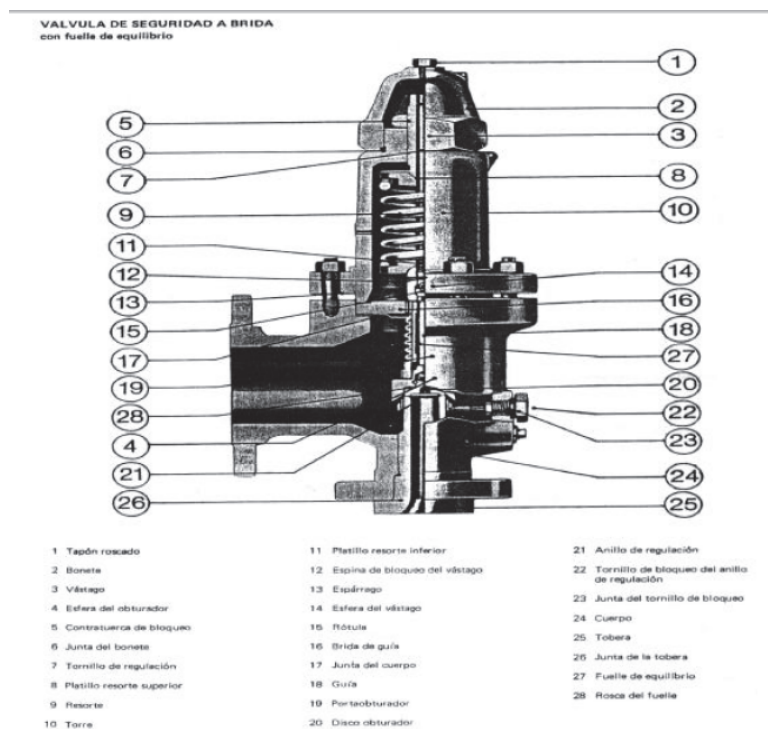
1.1. Componentes de una Válvula de Alivio:

Las válvulas de seguridad por alivio, se componen esencialmente de tres partes principales (ver Fig. 1 detalle completo):

Tobera: Conducto que permite una correcta conducción de la vena fluida de escape o descarga a través del cuerpo de la misma.

Obturador: Disco que cierra la luz de descarga con la tobera.

Resorte: Elemento que se opone a la fuerza del fluido sobre el disco obturador.



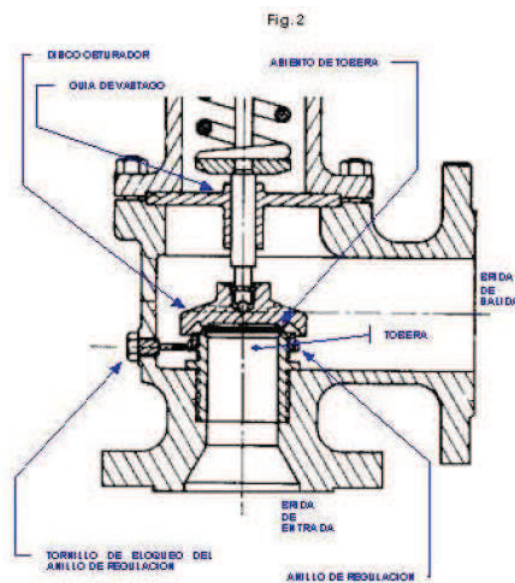
CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Válvulas con fuelle: El fuelle tiene una doble función:

- a) Evita una variación de la presión de escape (venteo) en presencia de contrapresiones variables.
- b) Cierra herméticamente la guía, preservándola del contacto con fluidos corrosivos en el momento de escape.

1.2. Anillo de regulación.

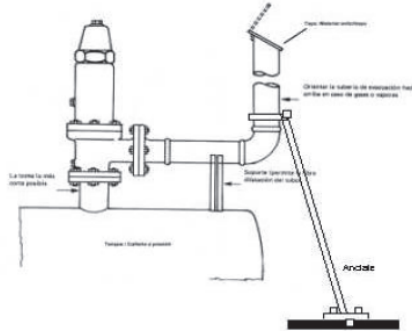
En el interior de la válvula, sobre el cuello de la tobera, se encuentra el anillo de regulación, el cual posee a su vez un tornillo de bloqueo para evitar el desplazamiento del mismo. El anillo de regulación, regula la distancia entre este y el obturador, incidiendo en la caída de presión entre la apertura y el cierre de la válvula.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Instalación de una Válvula de Alivio:

Fig. 3



Materiales principales de Válvulas de Alivio.

Denominación	Materiales
Cuerpo	Hierro fundido ASTM A-126
Bonete	Hierro fundido ASTM A-126
Asiento	Acero Inoxidable AISI 304/316
Disco	Acero Inoxidable AISI 304/316
Regulador Blow-up	Bronce fundido.
Tornillo de fijación.	Acero inoxidable AISI 410/420
Bolilla.	Acero inoxidable AISI 420
Reten	Acero inoxidable AISI 410/420
Guía de Vástago	Bronce Fundido
Resorte	Acero al carbono.
Arandelas de resorte.	Acero al carbono.
Vástago	Acero inoxidable AISI 410/420

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

En la tabla se describen, a modo de ejemplo los materiales constructivos empleados en válvulas de seguridad. Los mismos pueden variar según la aplicación a la que se puedan someter.

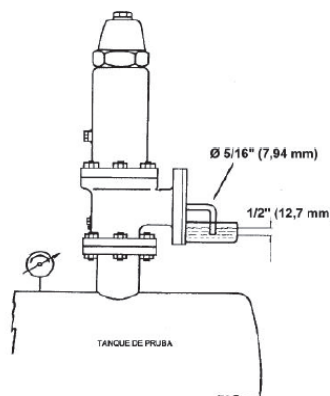
Identificación y Modelos estándar de Válvulas de Alivio

Descripción los modelos estándar típicos de las válvulas, la designación de las mismas pueden variar, dependiendo de la codificación de cada fabricante.

Denominación de Válvulas de Seguridad.				
Tobera	Sección cm²	Medida pulgadas	Bridas ANSI	Modelo
D	0.71	1" x 2"	150 x 150	105
E	1,27	1" x 2"	150 x 150	106
F	1.98	1 ½" x 2"	150 x 150	117
G	3.26	1 ½" x 2½"	150 x 150	107
H	5.06	1 ½" x 3"	150 x 150	127

Prueba de fugas en Válvulas de Alivio

Fig. 7



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Tipo de Válvula	Orificio	Pérdida máxima (burbujas por minuto)
Standard	D a F	40
	G a T	20
Estándar con fuelle	D a F	50
	G a T	30

Orificio	D	E	F	G	H	J
Variación porcentual de la presión de apertura a 1mm de carrera del tornillo de calibración.	33	22	18	15	12	9

Recomendaciones Generales

Calibración de presión – N.A.G.-100

1. Para presiones de operación mayores a 400 Kpa, la presión no deberá exceder más del 10% a la máxima admisible de operación o la presión que produce una tensión circunferencial del 75% de la TFME, de estas la que sea menor.
2. Para presiones admisibles entre 80 y 400 Kpa, la presión no podrá exceder la máxima admisible de operación en más de 50 Kpa.
3. Para presiones admisibles menores a 80 Kpa, la presión no podrá exceder en 1.5 veces la presión máxima de operación.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Presiones diferenciales – Código ASME VIII

1. Se recomiendan los valores descriptos a menos que la válvula de seguridad se haya diseñado o probado para un servicio específico y el fabricante recomiende valores diferentes a los detallados.

Rango de presión de Calibración	Mínima diferencia de presión para prueba	Tolerancia de ajuste de calibración	Diferencia de presión para ensayos de fugas
Hasta 482.6 Kpa.	34.5 Kpa.	± 13.8 Kpa	-10% o 34.5 Kpa
De 482.7 a 6894.8 Kpa.	10%	$\pm 3\%$	-10%
Encima de 6894.8 Kpa	7%	$\pm 3\%$	-5%

Resortes - Código ASME VIII – Div. 1 – Punto UG 126

1. Los resortes de calibración están diseñados para operar dentro de $\pm 5\%$ del valor nominal de presión, por lo que los valores calibrados deben estar dentro del rango del resorte. En caso de variar las condiciones de trabajo, el resorte debe ser reemplazado por uno de rango adecuado.
2. Trabajar por debajo del rango, provoca una menor alzada y un reducido caudal. Trabajar por encima del rango, provoca un valor incorregible de cierre y sobrecarga en el mismo, induciéndolo a la rotura.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Determinación de causas y soluciones de fallas

Fugas a través de las superficies de cierre

Causas:

1. Partículas u objetos extraños alojados entre las superficies de cierre.
2. Desalineación de las piezas móviles de la válvula durante el transporte, instalación y montaje.
3. Distorsión del cuerpo, debido a que la cañería de descarga no se encuentra adecuadamente soportada.
4. Presión de operación del sistema cercana a la de apertura de la válvula.
5. Fuente de vibraciones y/o pulsaciones de presión en proximidad de la válvula.
6. Tensiones térmicas debido a la irradiación de calor por diversas causas.

Soluciones:

1. Hacer soplar la válvula reiteradas veces, y si el problema subsiste, desarmarla e inspeccionar las superficies de cierre, si están dañadas deben ser lapeadas o reemplazadas.
2. Verificar que la válvula se encuentre instalada adecuadamente, es decir en posición vertical y con la entrada hacia abajo. Luego hacerla soplar dos o tres veces.
3. Soportar en forma adecuada la cañería de descarga.
4. Verificar que la diferencia entre la máxima presión de trabajo y la de apertura cumpla con lo indicado en ASME VIII, apéndice M. y este en el orden del 10%.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

5. Instalar amortiguador de vibraciones o alejar la válvula de seguridad de la fuente de oscilaciones de presión.
6. Emplear juntas de dilatación y soporte flexibles.

La válvula abre a una presión distinta a la calibrada

Causas:

1. Contra-presión variable.
2. Contra-presión real distinta a la especificada.
3. Armado incorrecto.
4. Desalineación de las superficies de cierre, durante el transporte o instalación.
5. Ajuste a temperatura ambiente de una válvula que opera a altas temperaturas.

Soluciones:

1. Comprobar, si la descarga se realiza en cañerías de igual o mayor diámetro al de salida de la válvula. Se recomienda utilizar válvulas balanceadas.
2. Recalibrar la válvula considerando la presión real de operación.
3. Verificar la presión de apertura y montaje adecuado de componentes.
4. Hacer operar la válvula dos o tres veces para permitir la auto-alineación de los internos.
5. Considerar los factores por corrección de temperatura en la calibración.

Al operar la válvula, se producen vibraciones

Causas:

1. Excesiva caída de presión en la línea de entrada.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

2. Excesiva contra-presión en la cañería de descarga.
3. Válvula sobre-dimensionada, cuando el caudal a evacuar es igual o menor al 25% del caudal nominal de la válvula.

Soluciones:

1. Verificar que la pérdida de carga sea inferior al 3% de la presión de apertura, de no ser así, reducir el largo de la cañería de entrada y/o aumentar el diámetro de la misma.
2. Verificar que la contra-presión total de la cañería de descarga sea menor a igual al 10% de la presión de apertura.
3. Reemplazarla por una válvula que cumpla con los requerimientos de diseño adecuados.

CALIBRACION Y MANTENIMIENTO DE VALVULAS DE SEGURIDAD POR ALIVIO PILOTEADAS

1. Objetivo
2. Alcance
3. Definiciones.
4. Actividades
 - 4.1. Operación del calibrador de pilotos de accionamiento
 - 4.2. Mantenimiento y ensayo de la válvula de seguridad
5. Equipos -Herramientas

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6. Aseguramiento de la Calidad.

7. Seguridad y Medio Ambiente

8. Anexos.

1. OBJETIVO

Enumerar y describir las distintas tareas que deberán llevarse a cabo en el mantenimiento y calibración de válvulas de seguridad por alivio operadas con pilotos diferenciales.

2. ALCANCE

Este instructivo o material de aprendizaje será de aplicación para todas las válvulas de seguridad por alivio con pilotos diferenciales, existentes en las instalaciones operadas.

3. DEFINICIONES

3.1. Válvula de seguridad por alivio: Dispositivo mecánico (válvula) de descarga automática, que tiene por función, mantener la presión de gas en un circuito, tanque o cañería dentro de un límite tope prefijado, eliminando el exceso de presión por venteo a la atmósfera a los fines de preservar la integridad estructural de los elementos, equipos y cañería de la instalación.

3.2. Presión de venteo o alivio: Presión a la cual la válvula se abre, rápida y completamente, evacuando sobre-presión del sistema.

3.3. Presión de cierre o bloqueo: Es la presión a la cual la válvula se bloquea totalmente, impidiendo el pasaje de gas a la atmósfera.

3.4. Presión de trabajo: Es la presión promedio a la cual opera normalmente el sistema.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

3.5. Contra presión estática: Es la presión existente en el colector o recipiente de descarga, con válvula cerrada.

3.6. Contra presión dinámica: Es la presión del fluido a la salida de la válvula en el momento de la descarga.

4. ACTIVIDADES

4.1. Operación del calibrador de pilotos de accionamiento.

Antes de realizar la prueba de la válvula de seguridad por alivio pilotada, se realizará el reemplazo de los aros sello y calibración de los pilotos (controladores), de apertura “RVC” y cierre “BDC”.

4.1.1. Calibración del piloto de alivio RVC

1. Despresurizar la válvula y desmontar el piloto de alivio RVC.
2. Desarmar el piloto, reemplazar el conjunto de aros sellos del mismo y rearmar (ver Fig.1).
3. Montar el piloto en el calibrador (ver Fig. 2) sin el capuchón superior, no siendo necesario un ajuste excesivo, debido al cierre hermético de los sellos.
4. Cerrar todas las válvulas del calibrador (válvulas 1 – 2 – 3 y 4).
5. Verificar la presión regulada del tubo de Nitrógeno. La misma se debe encontrar aproximadamente en un 20% mas, sobre la presión a que será calibrado el piloto.
6. Abrir la válvula 2 para ventear la cámara superior.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

7. Abrir lentamente la válvula 3, observando el manómetro B, hasta que se produzca el disparo del piloto.
8. Girar el tornillo de regulación en sentido horario para incrementar el punto de disparo, y en sentido antihorario para disminuir el mismo.
9. Repetir la operación del punto 7 y 8, hasta que el piloto se dispare en el punto de control deseado.
10. Una vez calibrado, ensayar dos a tres veces el disparo del piloto para verificar repetibilidad y registrar la presión de disparo.
11. Bloquear la fuente de presión de prueba.
12. Cerrar las válvulas 1 y 3, y abrir las válvulas 2 y 4 para despresurizar el calibrador, retirar el piloto y montarlo en la válvula de seguridad (ver punto 4.2.2.).

4.1.2. Calibración del piloto de cierre BDC

1. Desmontar el piloto de cierre BDC.
2. Desarmar el piloto, reemplazar el conjunto de aros sellos del mismo y rearmar (ver Fig.1).
3. Montar el piloto en el calibrador (ver Fig. 2) sin el capuchón superior, no siendo necesario un ajuste excesivo, debido al cierre hermético de los sellos.
4. Cerrar todas las válvulas del calibrador (válvulas 1 – 2 – 3 y 4).

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

5. Verificar la presión regulada del tubo de Nitrógeno. La misma se debe encontrar aproximadamente en un 20% mas, sobre la presión a que será calibrado el piloto.
6. Abrir lentamente la válvula 1, observando el manómetro A, hasta llegar a un 10% sobre el valor deseado de calibración, Se observará que mientras la presión en el manómetro A se incrementa rápidamente, en el B subirá lentamente. Una vez alcanzado el valor descripto, cerrar la válvula 1.
7. Abrir la válvula 4, para despresurizar la cámara inferior, observándose, que la presión en el manómetro B descienda a cero, manteniéndose la presión en el manómetro A.
8. Con la válvula 1 cerrada, abrir lentamente la válvula 2, observándose, que la presión comienza a descender lentamente, produciéndose un descenso brusco (a cero) en el punto de calibración.
9. Girar el tornillo de regulación en sentido horario para incrementar el punto de disparo, y en sentido antihorario para disminuir el mismo.
10. Repetir la operación de los puntos 6 a 8, hasta que el piloto se dispare en el punto de control deseado.
11. Una vez calibrado, ensayar dos a tres veces el disparo del piloto para verificar repetibilidad y registrar la presión de disparo.
12. Bloquear la fuente de presión de prueba.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

13. Cerrar las válvulas 1 y 3, y abrir las válvulas 2 y 4 para despresurizar el calibrador, retirar el piloto y montarlo en la válvula de seguridad (ver punto 4.2.2.).

4.2. Mantenimiento y ensayo de la válvula de seguridad:

4.2.1. Montaje y desmontaje de la válvula de seguridad

Tanto en el montaje como en el desmontaje deben tomarse las siguientes precauciones:

1. Evitar los golpes y sacudidas para no dañar las caras de asiento de las bridas y para evitar que se desajusten las partes internas.
2. En una línea o tanque presurizado, se debe despresurizar totalmente el sistema antes de proceder al montaje o desmontaje de la válvula.
3. En una línea o tanque presurizado, se debe despresurizar totalmente el sistema antes de proceder al montaje o desmontaje de la válvula.
4. Se debe soplar (barrido) la línea en la cual será instalada la válvula, con el fin de eliminar residuos y cuerpos extraños que puedan dañar el conjunto de internos.
5. Antes del montaje, se debe limpiar bien los asientos de las bridas y conexiones roscadas.
6. La válvula se debe instalar en posición vertical.
7. Los espárragos de las bridas, deben ser ajustados en forma uniforme y con el torque adecuado correspondiente a su sección.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

4.2.2. Mantenimiento de la válvula de seguridad.

Antes de montar los pilotos calibrados, se deberá desarmar la válvula y reemplazar los aros sello, partes blandas y controlar el estado de los internos de las mismas, reemplazándose las partes que pudieran estar defectuosas. También se realizará la limpieza de todos los conductos internos de la válvula (ver Fig. 3). Armar la válvula y montar los pilotos de alivio y cierre.

4.2.3. Ensayo de la válvula de seguridad

5. Se puede realizar el ensayo en línea, si el sistema lo permite (puntos 6 al 7).
6. Preferiblemente se realizará la calibración en un banco con un tanque de capacidad adecuada para la prueba.
7. Montar la válvula sobre el banco de prueba (para ensayo en banco).
8. Comprobar que el alivio tenga lugar a la presión de calibración exigida, con una tolerancia de $\pm 0.14 \text{ Kg/cm}^2$ para presiones de calibración inferiores a 4.9 Kg/cm^2 y $\pm 3\%$ para presiones de calibración iguales o superiores a 4.9 Kg/cm^2
9. Bajar la presión, a un 75% de la presión de disparo antes de operar, para cada ensayo que se realice.
10. Recalibrar los pilotos en caso necesario.
11. Si la válvula ha sido calibrada en un lugar distante al de su instalación, siempre debe ser probada en línea o banco de prueba, en el lugar de donde

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

se instalará, para garantizar la operación a los valores de calibración prefijados.

5.2.5. Prueba de fugas de la válvula de seguridad

1. Tapar la conexión de salida con un disco (espesor mínimo 3/8") o brida normalizada, en cuyo centro (ver Fig. 4) llevará un tubo de $\text{Ø } 5/16''$ (7.94 mm), el mismo se sumergirá a una profundidad de 1/2" (12.7 mm) en una cubeta con agua
2. La prueba de estanqueidad (API Std. 527), consiste en elevar la presión de entrada a la válvula según anexo 10.7, de la presión de calibración, y comprobar el número de burbujas por minuto que se observa en la cubeta, valor el cual no debe superar lo indicado en la tabla de la Fig. 5.
3. En caso que la pérdida fuera superior a lo indicado, se debe reparar el asiento, realizando un lapeado (esmerilado) del obturador, o bien reemplazar las partes dañadas según se estime conveniente.

6. EQUIPOS-HERRAMIENTAS

- 6.1. Vehículo liviano.
- 6.2. Vehículo para transporte del banco de calibración y/o batería de tubos de nitrógeno
- 6.3. Hidro-grúa / Grúa para desmontaje de válvula de mayor diámetro.
- 6.4. Caja con herramientas de mano.
- 6.5. Grasa liviana, pasta esmeril, desengrasante no combustible, trapos, etc.
- 6.6. Cristal para esmerilado.
- 6.7. Kit de repuestos y juntas para reparación de válvulas de alivio.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6.8. Manómetros patrones, clase 0.1, de rango adecuado, con certificado rastreable a patrón nacional o internacional reconocido como tal.

7. ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

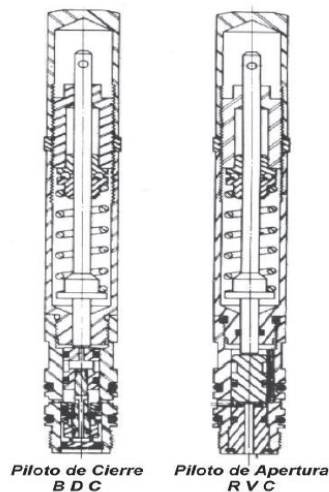
La Zona deberá contar con los Certificados de Calibraciones y Habilitaciones de equipos e instrumentos empleados para desarrollar las tareas o mediciones: Incluye a todo el instrumental y/o equipos que sea instalado y/o utilizado en el desarrollo de la actividad, con trazabilidad rastreable a patrón nacional o internacional reconocido como tal.

8. SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE

- ✚ Para la ejecución de los trabajos descritos, se deberán tomar estrictamente todas las medidas de seguridad establecidas en él: **Manual de Seguridad y Prevención de Accidentes de TGN.**
- ✚ A fin de mantener el control del sistema de transporte y garantizar la seguridad de las personas involucradas, se deberá comunicar al controlador de turno de Control de Gas.

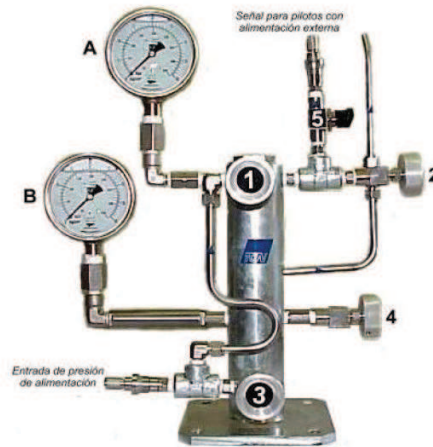
9. ANEXOS

9.1. Fig. 1 – Pilotos de apertura y cierre

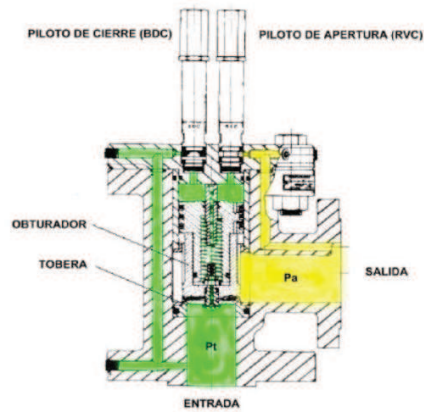


CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

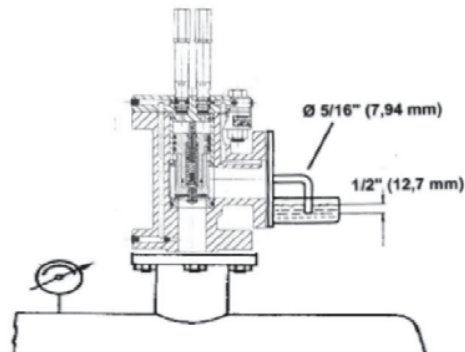
9.2. Fig. 2. Calibrador de pilotos diferenciales.



9.3. Fig.3 Válvula de Seguridad Pilotada.



9.4. Fig. 4 Pruebas de fugas.



CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

9.5. Fig. 5 – Fuga admisible (API Std. 527)

Tipo de Válvula	Orificio	Pérdida máxima (burbujas por minuto)
Standard	D a F	40
	G a T	20
Estándar con fuelle	D a F	50
	G a T	30

Recomendaciones Generales

Calibración de presión – N.A.G.-100

1. Para presiones de operación mayores a 400 Kpa, la presión no deberá exceder más del 10% a la máxima admisible de operación o la presión que produce una tensión circunferencial del 75% de la TFME, de estas la que sea menor.
2. Para presiones admisibles entre 80 y 400 Kpa, la presión no podrá exceder la máxima admisible de operación en más de 50 Kpa.
3. Para presiones admisibles menores a 80 Kpa, la presión no podrá exceder en 1.5 veces la presión máxima de operación.

Presiones diferenciales – Código ASME VIII

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

1. Se recomiendan los valores descriptos a menos que la válvula de seguridad se haya diseñado o probado para un servicio específico y el fabricante recomiende valores diferentes a los detallados.

Rango de presión de Calibración	Mínima diferencia de presión para prueba	Tolerancia de ajuste de calibración	Diferencia de presión para ensayos de fugas
Hasta 482.6 Kpa.	34.5 Kpa.	± 13.8 Kpa	-10% o 34.5 Kpa
De 482.7 a 6894.8 Kpa.	10%	$\pm 3\%$	-10%
Encima de 6894.8 Kpa	7%	$\pm 3\%$	-5%

Resortes - Código ASME VIII – Div. 1 – Punto UG 126

1. Los resortes de calibración están diseñados para operar dentro de $\pm 5\%$ del valor nominal de presión, por lo que los valores calibrados deben estar dentro del rango del resorte. En caso de variar las condiciones de trabajo, el resorte debe ser reemplazado por uno de rango adecuado.
2. Trabajar por debajo del rango, provoca una menor alzada y un reducido caudal. Trabajar por encima del rango, provoca un valor incorregible de cierre y sobrecarga en el mismo, induciéndolo a la rotura.

Determinación de causas y soluciones de fallas

Fugas a través de las superficies de cierre

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Causas:

1. Partículas u objetos extraños alojados entre las superficies de cierre.
2. Desalineación de las piezas móviles de la válvula durante el transporte, instalación y montaje.
3. Distorsión del cuerpo, debido a que la cañería de descarga no se encuentra adecuadamente soportada.
4. Presión de operación del sistema cercana a la de apertura de la válvula.
5. Fuente de vibraciones y/o pulsaciones de presión en proximidad de la válvula.
6. Tensiones térmicas debido a la irradiación de calor por diversas causas.

Soluciones:

1. Hacer soplar la válvula reiteradas veces, y si el problema subsiste, desarmarla e inspeccionar las superficies de cierre, si están dañadas deben ser lapeadas o reemplazadas.
2. Verificar que la válvula se encuentre instalada adecuadamente, es decir en posición vertical y con la entrada hacia abajo. Luego hacerla soplar dos o tres veces.
3. Soportar en forma adecuada la cañería de descarga.
4. Verificar que la diferencia entre la máxima presión de trabajo y la de apertura cumpla con lo indicado en ASME VIII, apéndice M. y este en el orden del 10%.
5. Instalar amortiguador de vibraciones o alejar la válvula de seguridad de la fuente de oscilaciones de presión.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

6. Emplear juntas de dilatación y soporte flexibles.

La válvula abre a una presión distinta a la calibrada

Causas:

1. Contra-presión variable.
2. Contra-presión real distinta a la especificada.
3. Armado incorrecto.
4. Desalineación de las superficies de cierre, durante el transporte o instalación.
5. Ajuste a temperatura ambiente de una válvula que opera a altas temperaturas.

Soluciones:

1. Comprobar, si la descarga se realiza en cañerías de igual o mayor diámetro al de salida de la válvula. Se recomienda utilizar válvulas balanceadas.
2. Recalibrar la válvula considerando la presión real de operación.
3. Verificar la presión de apertura y montaje adecuado de componentes.
4. Hacer operar la válvula dos o tres veces para permitir la auto-alineación de los internos.
5. Considerar los factores por corrección de temperatura en la calibración.

Al operar la válvula, se producen vibraciones

Causas:

1. Excesiva caída de presión en la línea de entrada.
2. Excesiva contra-presión en la cañería de descarga.

CONTROL DE UNA CALDERA, APLICANDO INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

3. Válvula sobre-dimensionada, cuando el caudal a evacuar es igual o menor al 25% del caudal nominal de la válvula.

Soluciones:

1. Verificar que la pérdida de carga sea inferior al 3% de la presión de apertura, de no ser así, reducir el largo de la cañería de entrada y/o aumentar el diámetro de la misma.
2. Verificar que la contra-presión total de la cañería de descarga sea menor a igual al 10% de la presión de apertura.
3. Reemplazarla por una válvula que cumpla con los requerimientos de diseño adecuados.

CRONOGRAMA DE INVESTIGACIÓN.

Actividad	Objetivo	Rol de la Investigación	Instrumento	Espacio
Fase Uno: Definición de la Situación / Problema "Formulación Teórica"				
Planeación	Planear el tiempo, las prácticas y las fases de la Investigación.	Planear y Organizar Datos de Investigación.	Libros e Investigaciones de Campo	ULEAM Bibliotecas
Formulación del Proyecto de Investigación.	Revisión Teórica, tesis, Investigaciones y Normas de Calibración.	Libros Profesionales. Normas ISO, INEN, ANSI	Bibliotecas e Internet	ULEAM. RV INGENIERIA S.A "LA FABRIL" S.A
Fase Dos: Trabajo de Campo.				
Recolección de Información.	Codificar información, y Normas a utilizar.	Investigación y Trabajo de Campo	Estructura de Calibración de Instrumentos	INEN.
Organización de la Información.	Organizar Información.	Investigación y Trabajo de Campo	Control de Calderos	RV INGENIERIA S.A.

Plan de Trabajo	Cronograma 2012 -2013		
	Noviembre	Diciembre	Enero
Elaboración del plan de Investigación.	X		
Coordinación de Actividades.	X		
Organización de datos.	X	X	
Implementación.	X	X	
Elaboración de Instrumentos.	X	X	X
Aplicación de Instrumentos.	X	X	X
Procesamientos de datos		X	
Análisis de datos.		X	X
Interpretación de datos.		X	X
Elaboración de informe.		X	X
Comunicación de resultados.		X	X
Tutorías Académicas.	X	X	X

8. CONCLUSIONES.

El presente trabajo nos lleva a concluir que un sistema de control de procesos industriales, diseñado y estructurado de forma oportuna considerando las ventajas que ofrecen su aporte de una herramienta sólida, identificar la función primordial que cumplen los dispositivos de Instrumentación, Automatización y Control de Procesos Industriales en el Campo Industrial, para mejorar Procesos Industriales desempeñarse con eficacia y eficiencia, el funcionamiento de componentes de Instrumentación de Campo, tales como lo son los Sensores, Transmisores, Válvulas y Elementos Finales de Control Industriales buscando un mayor conocimiento en Control Industrial e Instrumentación Virtual, materias altamente apreciadas en el entorno industrial.

Las razones que se argumentan en la presente indagación son el resultado de un trabajo arduo de Investigación que pretende verificar y aportar aspectos teóricos e experimentales, con la finalidad de brindar conocimiento Científico; promoviendo la Investigación Científica y el Desarrollo del Pensamiento, por lo tanto, las razones que sustentan la investigación se fundamentan en la utilización de Instrumentos de Control y Modelos Investigativos.

Esperamos que este humilde aporte sirva como una herramienta básica de control, para posteriores investigaciones de campo o de cualquier índole investigativo.

9. BIBLIOGRAFÍA.

- ✚ CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentación Industrial** 8ª Edición. Editorial Alfaomega Marcombo Ediciones Técnicas. Año 2011.
- ✚ CREUS SOLE ANTONIO. **Fiabilidad y Seguridad: Su aplicación en procesos Industriales.** Editorial Alfaomega Marcombo Ediciones Técnicas. Año 2006.
- ✚ ACEDO SANCHEZ JOSE. **Instrumentación y control Avanzado de Procesos.** Editorial Limusa. Año 2006.
- ✚ CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentos Industriales. Su calibración y ajuste.** 3ª Edición. Editorial Alfaomega Marcombo. Ediciones Técnicas Año 2009.
- ✚ CURTIS JOHNSON D. **Process Control Instrumentation Technology** 6ª Edición. United State of America. Prentice- hall. Año 2003.
- ✚ BAJZEK T.J. Thermocouples: A Sensor for Measuring Temperature. IEEE Instrumentation Measument Magazine. Year 2006.
- ✚ Honeywell Catálogo de Productos para el control de Calderas de Vapor. 2011

REFERENCIAS Y NOTAS BIBLIOGRAFICAS.

Marco Teórico.

1. CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentación Industrial** 6ª Edición. Editorial Alfaomega Marcombo Ediciones Técnicas. Año 2010. Pág. # 1.
2. CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentación Industrial** 6ª Edición. Editorial Alfaomega Marcombo Ediciones Técnicas. Año 2010. Pág. # 2.
3. CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentación Industrial** 6ª Edición. Editorial Alfaomega Marcombo Ediciones Técnicas. Año 2010. Pág. # 4.
4. CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentación Industrial** 6ª Edición. Editorial Alfaomega Marcombo Ediciones Técnicas. Año 2010. Pág. # 7.
5. CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentación Industrial** 6ª Edición. Editorial Alfaomega Marcombo Ediciones Técnicas. Año 2010. Pág. # 10.
6. CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentación Industrial** 6ª Edición. Editorial Alfaomega Marcombo Ediciones Técnicas. Año 2010. Pág. # 12.
7. CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentación Industrial** 6ª Edición. Editorial Alfaomega Marcombo Ediciones Técnicas. Año 2010. Pág. # 29-30.
8. CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentación Industrial** 6ª Edición. Editorial Alfaomega Marcombo Ediciones Técnicas. Año 2010. Pág. # 38.
9. CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentación Industrial** 6ª Edición. Editorial Alfaomega Marcombo Ediciones Técnicas. Año 2010. Pág. # 35.

- ✚ 10. CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentación Industrial** 6ª Edición. Editorial Alfaomega Marcombo Ediciones Técnicas. Año 2010. Pág. # 37.
- ✚ 11. CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentación Industrial** 8ª Edición. Editorial Alfaomega Marcombo Ediciones Técnicas. Año 2011. Pág. #38.
- ✚ 12. CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentación Industrial** 8ª Edición. Editorial Alfaomega Marcombo Ediciones Técnicas. Año 2011. Pág. #41.
- ✚ 13. CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentación Industrial** 8ª Edición. Editorial Alfaomega Marcombo Ediciones Técnicas. Año 2011. Pág. #43.
- ✚ 14. CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentación Industrial** 8ª Edición. Editorial Alfaomega Marcombo Ediciones Técnicas. Año 2011. Pág. #45.
- ✚ 15. CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentación Industrial** 8ª Edición. Editorial Alfaomega Marcombo Ediciones Técnicas. Año 2011. Pág. #49.
- ✚ 16. CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentación Industrial** 8ª Edición. Editorial Alfaomega Marcombo Ediciones Técnicas. Año 2011. Pág. #52.
- ✚ 17. CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentos Industriales. Su calibración y ajuste.** 3ª Edición. Editorial Alfaomega Marcombo. Ediciones Técnicas Año 2009. Página 53.
- ✚ 18. CURTIS JOHNSON D. **Process Control Instrumentation Technology** 6ª Edición. United State of America. Prentice- hall. Año 2003. Pág.54.
- ✚ 19. CURTIS JOHNSON D. **Process Control Instrumentation Technology** 6ª

Edición. United State of America. Prentice- hall. Año 2003. Pág.55-56.

✚ 20. CURTIS JOHNSON D. **Process Control Instrumentation Technology 6^a**

Edición. United State of America. Prentice- hall. Año 2003. Pág.54.

✚ 21. CURTIS JOHNSON D. **Process Control Instrumentation Technology 6^a**

Edición. United State of America. Prentice- hall. Año 2003. Pág.64.

✚ 22. CURTIS JOHNSON D. **Process Control Instrumentation Technology 6^a**

Edición. United State of America. Prentice- hall. Año 2003. Pág.65.

✚ 23 CURTIS JOHNSON D. **Process Control Instrumentation Technology 6^a**

Edición. United State of America. Prentice- hall. Año 2003. Pág.68.

✚ 24, 25, 26. CURTIS JOHNSON D. **Process Control Instrumentation**

Technology 6^a Edición. United State of America. Prentice- hall. Año 2003.

Pág.77, 79, 81-82.

✚ 27,28, 29, 30, 31, 32, CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentos Industriales. Su**

calibración y ajuste. 3^a Edición. Editorial Alfaomega Marcombo. Ediciones

Técnicas Año 2009. Páginas # 81-82, 85, 88, 90, 98, 102

✚ 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40 CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentación**

Industrial 8^a Edición. Editorial Alfaomega Marcombo Ediciones Técnicas. Año

2011. Páginas. #115, 117, 120, 127, 130, 142, 145, 153.

✚ 40, 41, 42, 43, 44, 45 CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentos Industriales. Su**

calibración y ajuste. 3^a Edición. Editorial Alfaomega Marcombo. Ediciones

Técnicas Año 2009. Páginas # 153, 161, 176, 186, 191, 195.

 46, 47, 48, 49, 50 CREUS SOLE ANTONIO. **Instrumentación Industrial 8^a**

Edición. Editorial Alfaomega Marcombo Ediciones Técnicas. Año 2011. Páginas.

#202, 222, 236-237, 242, 250.

10. ANEXOS.





