

33  
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

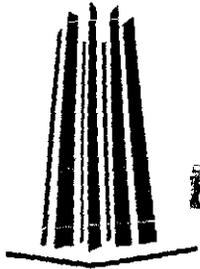
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
"CAMPUS ARAGON"

"FUNDAMENTOS DE LA INSTRUMENTACION  
Y DE LA REGULACION AUTOMATICA CON  
APLICACIONES A LA INDUSTRIA".

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICO  
P R E S E N T A:  
**RICARDO PAREDES RUBIO**

ASESOR: ING. DAVID MOISÉS TERÁN PÉREZ



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

MÉXICO

26/1/90

1999



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**

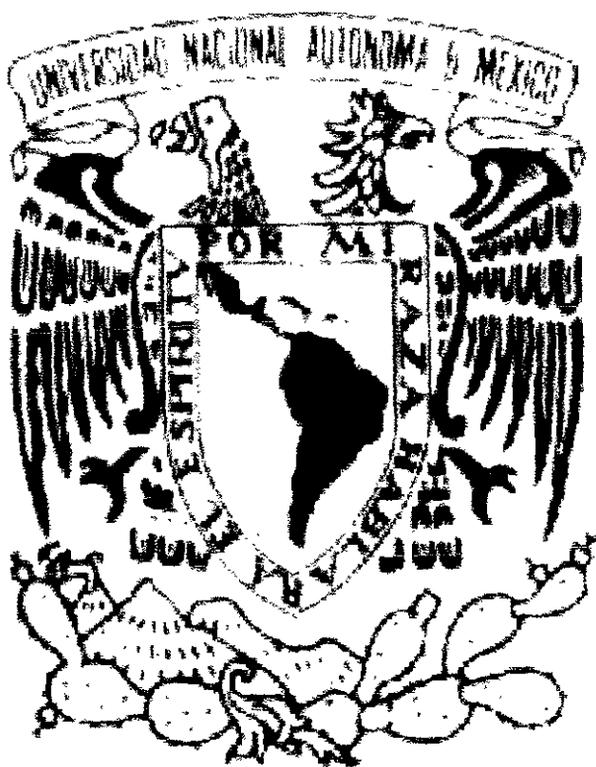


**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MEXICO

San Juan de Aragon, Estado de Mexico a 09 de Octubre de 1998

Lic. Alberto Ibarra Rosas.  
Jefe de la Secretaria Académica  
U N A M Campus Aragon

P R E S E N T E

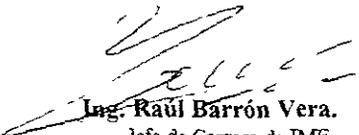
Por medio de la presente, le comunico que el Alumno **PAREDES RUBIO RICARDO** con Número de Cuenta **8417377-7** de la Carrera de **Ingeniería Mecánica Eléctrica**, ha concluido satisfactoriamente su trabajo de tesis titulado

" FUNDAMENTOS DE LA INSTRUMENTACIÓN Y DE LA REGULACIÓN AUTOMÁTICA CON APLICACIONES A LA INDUSTRIA "

Dicho trabajo ha sido revisado y autorizado por el suscrito, por lo que, solicito a Usted de la manera mas atenta, se autorice la Orden de impresion del mismo

Sin otro particular, quedo a sus órdenes para cualquier aclaración al respecto

A t e n t a m e n t e



Ing. Raúl Barrón Vera.  
Jefe de Carrera de IME



Ing. David Moises Terán Pérez  
Asesor de Tests

c c p Ing. Raúl Barrón Vera.  
Jefe de la Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
U N A M Campus Aragon

Interesado.

Jefatura de Servicios Escolares.  
de la U N A M Campus Aragón

001 9 11 45 11 1988

SECRETARIA ACADÉMICA



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ARAGÓN  
DIRECCION

RICARDO PAREDES RUBIO  
P R E S E N T E .

En contestación a la solicitud de fecha 25 de agosto del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. DAVID MOISÉS TERAN PÉREZ pueda dirigirle el trabajo de tesis denominado, "FUNDAMENTOS DE LA INSTRUMENTACIÓN Y DE LA REGULACIÓN AUTOMÁTICA CON APLICACIONES A LA INDUSTRIA", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"<sup>M.</sup>  
San Juan de Aragón, México., 1 de septiembre de 1998  
EL DIRECTOR

Lic. CARLOS EDUARDO LEVY VAZQUEZ



c c p Secretaría Académica.  
c c p Jefatura del Area de Ingeniería Mecánica Eléctrica.  
c c p Asesor de Tesis.

CELV/AIR/MCA/IIa.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
CAMPUS ARAGÓN

SECRETARÍA ACADÉMICA

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

Ing. RAÚL BARRÓN VERA  
Jefe de la Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica,  
Presente.

En atención a la solicitud de fecha 22 de octubre del año en curso, por la que se comunica que el alumno RICARDO PAREDES RUBIO, de la carrera de Ingeniero Mecánico Electricista, ha concluido su trabajo de investigación intitulado "FUNDAMENTOS DE LA INSTRUMENTACIÓN Y DE LA REGULACIÓN AUTOMÁTICA CON APLICACIONES A LA INDUSTRIA", y como el mismo ha sido revisado y aprobado por usted, se autoriza su impresión; así como la iniciación de los trámites correspondientes para la celebración del Examen Profesional.

Sin otro particular, reitero a usted las seguridades de mi atenta consideración.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
San Juan de Aragón, México, 23 de octubre de 1998  
EL SECRETARIO

Lic. ALBERTO IBARRA ROSAS

c c p Asesor de Tesis  
c c p Interesado.

AIR/vr



ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS  
PROFESIONALES ARAGON - UNAM

JEFATURA DE AREA DE INGENIERIA  
MECANICA ELECTRICA

OFICIO: ENAR/JAME/1159/98.

ASUNTO: Revisión previa de tesis  
antes de autorizar su  
impresión.

ING. DAVID MOISES TERAN PEREZ  
ING. EMILIO LUIS FLORES LOPEZ  
ING. JOSÉ RODRIGUEZ LUNA  
ING. JAIME ROLANDO ARROYO MORA  
ING. JESUS NUÑEZ VALADEZ

En forma anexa le hago entrega de un ejemplar del proyecto de tesis titulado "FUNDAMENTOS DE LA INSTRUMENTACION Y DE LA REGULACION AUTOMATICA CON APLICACIONES A LA INDUSTRIA" del alumno RICARDO PAREDES RUBIO, con número de cuenta 8417377-7.

Esto con el fin de que sea revisada por usted, y nos de su evaluación y comentarios por escrito, mismo que le pido me haga llegar a la brevedad posible.

Agradezco de antemano su colaboración y aprovecho la oportunidad para en viarle un cordial saludo.

A t e n t a m e n t e  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Bosques de Aragón, Edo. de Méx., Octubre 13, 1998.  
EL SECRETARIO TECNICO

  
ING. IVAN MUÑOZ SOLIS



  
C.c.p. Alumno.

IMS/scd.

*Te alabaré, oh Jehová, con todo mi corazón;  
Contaré todas tus maravillas.  
Me alegrare y me regocijaré en ti;  
Cantare a tu nombre, oh Altísimo*

*Salmos 9:1-2*

### **MI ALMA SE GOZA EN TI OH JEOHVA**

*Agradezco a DIOS, por la oportunidad que me ha concedido en titularme.  
Para la honra y gloria de nuestro SEÑOR JESUCRITO. Que sin él no podría haber terminado mi estudio profesional.*

### **A LA IGLESIA DE CRISTO (PANTITLAN)**

*A Todos Gracias por sus Oraciones. Y que DIOS los Bendiga hoy y siempre.*

### **A LA SOCIEDAD DE JOVENES**

*Por su apoyo y sus oraciones a todos y cada uno de ustedes gracias.*

*Que DIOS nos Bendiga hoy y siempre.  
Y recordemos que DIOS siempre nos  
Ayuda.*

**RICARDO PAREDES RUBIO.**

## A MIS PADRES.

*Por brindarme, su apoyo económico y su comprensión moral, en donde no tengo palabras para agradecer, todo lo que me han proporcionado, por eso les dedicó él título con mucho cariño y respeto, a ustedes mil GRACIAS.*

## A MIS HERMANOS.

*Por ayudarme durante todo el tiempo que estuve, estudiando, tanto económico como moral, a ti Arturo, Patricia, Jorge, José Luis, José Raúl, Laura, Hugo Fidel y Eli Josué.  
A todos y cada uno de ustedes GRACIAS.*

## A MIS CUÑADOS (AS).

*Por que día a día me preguntaban hasta cuando, y hoy, es un hecho, a todos gracias.*

## A MIS SOBRINOS.

*Que todo se puede realizar con esfuerzo, dedicación y que nunca es tarde para terminar.*

## **A MIS PROFESORES.**

*A toda mi docencia, que tuve en mi trayecto escolar.  
Y a los que me ayudaron a realizar este trabajo para titularme  
que se encuentran mencionados en esta tesis, a ustedes gracias.*

## **A COMPAÑEROS Y AMIGOS.**

*A compañeros de escuela que es difícil de acordarme.  
Y amigos que me insistían que cuando me titulaba.  
A todos ustedes gracias.*

*Hoy y siempre a todos GRACIAS.*

*RICARDO PAREDES RUBIO.*

## INTRODUCCIÓN

Los Instrumentos de Control están universalmente aceptados. Hoy en día es inimaginable la existencia de una Industria Moderna sin instrumentos. Y, aunque existiera, las necesidades, que crea el Mercado de obtener productos terminados con las garantías de Calidad exigidas y en la cantidad suficiente para que el precio obtenido sea competitivo; forzarían a modificar esta hipotética Industria, incluyendo en la transformación subsiguiente la autorización de el Proceso mediante los Instrumentos de Medición y Control.

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 de el Proceso. Así le ocurre a el Jefe ó a el Operador de el Proceso, a el Proyectista y a su Ingeniería, a el Estudiante y a cualquier persona que esté relacionada ó vaya a relacionarse con el Proceso, sin mencionar como es lógico a el Instrumentista ó a el Técnico en instrumentos para quienes el tema es la esencia de su Profesión.

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, etcétera.

En todos estos Procesos es absolutamente necesario controlar y mantener constantes algunas magnitudes; tales como la Presión, el Caudal, el Nivel, la Temperatura, el pH, la Conductividad, la Velocidad, la Humedad, el Punto de Rocío, etcétera.

Los Instrumentos de Medición y Control permiten 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 sólo instrumentos simples como: Manómetros, Termómetros, Válvulas Manuales, etcétera; 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 de el Proceso desde Centros de Control situados en el propio Proceso ó bien en salas aisladas separadas; así mismo, gracias a los instrumentos ha sido posible fabricar productos complejos en condiciones estables de Calidad y de características inherentes a el Producto, condiciones que a el Operario le serían imposibles ó muy difíciles de conseguir, realizando exclusivamente un control manual.

Los Procesos Industriales a controlar pueden dividirse ampliamente en dos Categorías: Procesos Contínuos y Procesos Discontínuos. En ambos tipos, deben mantenerse en general las variables (presión, caudal, nivel, temperatura, etcétera), bien en un valor deseado fijo, bien en un valor variable con el tiempo, de acuerdo con una relación predeterminada, ó bien guardando una relación determinada con otra variable. El Sistema de Control que permite este mantenimiento de las variables puede definirse como aquel que compara el valor de la variable ó condición a controlar con un valor deseado y toma una acción de corrección de acuerdo con la desviación existente sin que el operario intervenga en lo absoluto.

## JUSTIFICACIÓN

Ningún experimento puede ser catalogado como fácil, ni existe sustituto de la experimentación cuidadosa en muchas áreas de la investigación básica, y del desarrollo de Productos de Aplicación. Existe la necesidad bien definida de que el Ingeniero esté familiarizado, tanto con los Métodos de Medición, como con las técnicas de análisis para la interpretación de los datos experimentales, debido a que la experimentación es muy importante en todos los campos de la Ingeniería.

Las técnicas experimentales han cambiado muy rápidamente con el desarrollo de Dispositivos Electrónicos encaminados a detectar parámetros físicos primarios; así como para controlar variables de Procesos. En muchos casos, es posible obtener más precisión en la medición de cantidades físicas básicas por medio del uso de estos nuevos dispositivos. Se puede afirmar, con certeza, que el desarrollo de las técnicas de instrumentación será más amplio y más rápido debido a la creciente demanda de medición y control de variables físicas en una amplia variedad de aplicaciones. Para afrontar esta demanda, el Ingeniero debe estar familiarizado con los principios básicos y las ideas que rigen el desarrollo y uso de la Instrumentación.

Obviamente, para poder llevar a cabo experimentos satisfactorios, es necesario tener firmes conocimientos de Ingeniería. Para diseñar un experimento, el Ingeniero debe ser capaz de especificar las variables físicas que necesita investigar y el papel que éstas desempeñarán en el trabajo analítico posterior. Por lo tanto, para diseñar ó implementar la Instrumentación de un experimento, el Ingeniero debe conocer los principios de Operación de una gran cantidad de Instrumentos.

Finalmente, para analizar sus datos, el Ingeniero debe poseer una combinación de agudo conocimiento de los principios físicos relativos a los Procesos que está investigando, y el conocimiento de las limitaciones de sus datos. La investigación requiere de una combinación de trabajo analítico y experimental. El teórico se empeña en explicar ó predecir los resultados de los experimentos en base a Modelos Analíticos acordes con los principios físicos que han sido establecidos a través de los años.

Cuando se encuentran datos experimentales que no están de acuerdo con el esquema de las teorías existentes, primero se mira con escepticismo a los datos, luego a las teorías correspondientes. En algunos casos, una vez que se tiene la seguridad que la validez de los datos ha sido comprobada, las teorías se modifican ó revisan, de forma que tomen en cuenta los resultados de los nuevos datos experimentales. En todos los casos, las teorías físicas deben confiarse a un experimento para su verificación.

Ya sea que la experimentación sea de carácter básico ó de desarrollo tecnológico, siempre se hace patente su papel dominante. El físico nuclear, por ejemplo; debe probar siempre sus teorías en el laboratorio para estar seguro de su validez, de la misma forma que el Ingeniero que dirige una investigación sobre un nuevo circuito electrónico ó un nuevo tipo de Sistema Hidráulico, debe llevar a cabo un número significativo de experimentos para poder establecer la utilidad de el Producto. La experimentación es la prueba decisiva de la mayoría de las teorías.

En muchas aplicaciones de la Ingeniería se conocen bastante bien algunos fenómenos físicos básicos, y la experiencia obtenida con dispositivos que hágan uso de ellos, se encuentra a nuestro alcance. Ejemplos de éstos son: Los tubos de vacío, los medidores de flujo, etcétera. Sin embargo, siempre aparecerán nuevos usos para estos aparatos en combinación con otros dispositivos, por ejemplo; un nuevo tipo de amplificador, un nuevo sistema de control de flujo, etcétera. En estos casos, el Ingeniero debe utilizar toda su experiencia con los dispositivos anteriores para diseñar el aparato que involucre una nueva aplicación.

En todos los casos, antes de que se finalice el diseño y se comience la producción, el Ingeniero debe insistir en realizar pruebas intensivas del nuevo aparato, sin importar que tan confiable haya sido la información en la cual basó su diseño.

Existe una amplia gama de pruebas y experimentos que el Ingeniero puede llevar a cabo; éstos pueden variar desde la burda prueba de determinar el peso de un dispositivo, hasta el efectuar algunas mediciones excesivamente precisas de radiactividad nuclear. Ya que el rango de experimentos es tan amplio, que la preparación de el Ingeniero en el campo experimental debe ser sumamente diversa para poder trabajar adecuadamente en muchas situaciones experimentales. Obviamente, es muy aventurado suponer que una sola persona pueda operar a tan alto grado de efectividad en todas las áreas del trabajo experimental.

## ANTECEDENTES AL TRABAJO

En el pasado, existían algunos Ingenieros que eran fundamentalmente experimentadores, es decir; aquellos individuos que diseñaban dispositivos por el método de prueba y error ("*tanteos*") en el cual se utilizaba muy poco trabajo analítico previo a la experimentación. Existen algunas áreas de la Ingeniería en las que esta técnica aún prevalece; principalmente en aquellas en las que los años de experiencia han legado un cúmulo de conocimientos en los que se pueda confiar. Sin embargo, en los nuevos campos, se debe dar más importancia a una combinación de teoría y experimentación. Por dar un ejemplo rebuscado que contraste ambas técnicas, mencionando el desarrollo de un motor cohete. Podría ser posible construir cohetes de diferentes tamaños y probar cada uno hasta lograr una combinación afortunada de los parámetros de diseño; sin embargo, con este procedimiento el costo del proyecto sería prohibitivo. El enfoque apropiado para este problema es aquel en el que se utilicen estudios teóricos y pruebas experimentales, en donde los datos experimentales se evalúen sistemáticamente y se comparen con las predicciones teóricas; a partir de éstos, se formulan nuevas teorías en base a las mediciones realizadas, y estas teorías ayudan a guiar las pruebas posteriores hasta llegar al diseño final.

Es necesario que el Ingeniero conozca qué es lo que busca, antes de empezar a realizar sus experimentos. El objetivo del experimento definir el grado de exactitud en las mediciones y justificar los gastos, así como los Recursos Humanos necesarios. Una cuestión tan sencilla, como es la revisión de la Calibración de un Termómetro de Mercurio, podría realizarse en relativamente poco tiempo y con cantidad limitada de equipo; por otro lado, la medición exacta de la temperatura de un flujo de gas a alta velocidad y a unos 3 000°F podría necesitar de mayor planeación y cuidado.

Una prueba de un amplificador destinado a un sistema musical doméstico podría ser menos exacta que la análoga para el caso de un amplificador que será utilizado como parte del equipo electrónico de un Satélite, y así sucesivamente. A el Ingeniero no sólo le interesa la medición de variables físicas, sino también su control. Estas dos funciones están íntimamente ligadas, ya que se debe poder medir una variable; como el gasto ó la temperatura, para poder controlarla.

La exactitud del control está necesariamente relacionada con la exactitud de la medición; por lo tanto, es necesario tener un buen conocimiento de las técnicas de medición para efectuar el diseño de Sistemas de Control.

## PLAN PROPUESTO

Para que los datos tengan máxima significación, no es suficiente que el Ingeniero realice mediciones hábiles sobre las variables, sino que además debe ser capaz de precisar el grado de exactitud con que las ha medido. Para especificar la exactitud, deben conocerse las limitaciones de los aparatos, así como tomar muy en cuenta los posibles errores sistemáticos y/o aleatorios que pueden ocurrir en la obtención de los datos experimentales. El Ingeniero debe familiarizarse con el manejo de técnicas estadísticas para poder analizar adecuadamente sus datos; por medio de dichas técnicas es posible determinar los errores esperados y las desviaciones sobre las medidas reales.

Con frecuencia, el ingeniero se aboca a un programa experimental sin tener una metodología previa, lo cual puede ocasionar: Que los datos se recopilen al azar, por lo que muchos de ellos no servirán para un análisis posterior; además, algunos rangos de operación no se llegan a investigar en toda su extensión, lo cual conduce a una colección de datos que puede tener poco valor correlativo.

El Ingeniero debe estar seguro de tomar suficientes datos, pero no debe perder tiempo, ni dinero tomando demasiados. El meollo del asunto es que los experimentos deben planearse cuidadosamente. La mayoría de los experimentadores planean pruebas con respecto al rango de las variables que desean investigar, pero frecuentemente no toman en cuenta el hecho de que en algunos intervalos de operación se necesita tomar más datos que en otros para poder asegurar el mismo grado de exactitud en la evaluación final de los datos.

En otras palabras, al planear un experimento se deben tomar en cuenta las estimaciones que proporcionan los métodos del análisis estadístico ó de cualquier otra índole en la misma forma en que se toman en cuenta ciertos parámetros en el dimensionamiento de un aparato. El Ingeniero siempre debe preguntarse: ¿Qué tantas mediciones necesito para asegurar que mis datos no son resultado del azar?

Por el momento, es pertinente hacer unas breves observaciones respecto a la investigación experimental. Es muy difícil describir la atmósfera y las técnicas involucradas en la investigación, ya que, contrariamente al desarrollo de las pruebas de Control de Calidad, en donde los experimentos se conducen de acuerdo a un procedimiento bien definido; en la Investigación Científica es raro hallar una rutina establecida. Cada problema es diferente de los demás, y si la Investigación es importante, es que no ha sido atacada antes en forma excesiva. Esto origina que el Ingeniero comprometido en la Investigación debe estar preparado para afrontar numerosas dificultades experimentales de complejidad varia.

En algunos casos, es recomendable reducir la intensidad de algunos objetivos de la Investigación debido a la falta de disponibilidad de la instrumentación necesaria para medir las variables implicadas. Muchos detalles aparentemente insignificantes llegan a ser problemas importantes antes de que una nueva estructura experimental funcione apropiadamente. Uno de los problemas básicos es que el Ingeniero rara vez mide en forma directa la variable que le interesa y, aunque siempre existen factores de corrección aplicables a las mediciones, muy pocas veces estas correcciones caen dentro de las categorías de "normales". De esta manera, se van juntando detalles aparentemente insignificantes hasta que el problema experimental adquiere una complejidad que generalmente no se anticipó al principio de la Investigación.

Frecuentemente, el experimentador neófito supone que un experimento en particular se llevar a cabo sin dificultad. Todo lo que necesita hacer es colocar el aparato, encenderlo e inmediatamente se obtendrán grandes cantidades de datos significativos que impresionarán a sus colegas (ó a su Supervisor). El novato no toma en cuenta que un simple aparato puede fallar y, por lo tanto, arruinar el experimento. Una vez que el aparato está funcionando apropiadamente, puede perjudicarse otro y así sucesivamente. Una vez que los aparatos estén funcionando, el neófito estará tentado a tomar mediciones al azar sin tener muy en cuenta los resultados que quiere obtener de ellas. Tratar de resolver todos los problemas a la vez, variando muchos parámetros al mismo tiempo, de manera que se ejercerá poco control sobre los datos y a la postre llegar a ser necesario retroceder y repetir algo del trabajo.

Para lograr lo propuesto en este trabajo, la tesis se divide en los siguientes capítulos:

En el Capítulo I, se dan las Generalidades de las Mediciones; es decir, se examinan los Términos que definen a los Instrumentos y un Código para su Identificación.

En el Capítulo II, se estudian los Transmisores, y se realiza su Análisis Dinámico con una breve idea de los retardos en las Señales de Transmisión.

En el Capítulo III, se describen los Sistemas de Control utilizados explicando los Conceptos de el Control Proporcional, Integral y Derivativo con sus valores consignados en el Instrumento. De igual forma, estudia el Control desde el punto de vista dinámico, lo que permite deducir un camino para la Optimización de los Procesos en el cual están basados los criterios establecidos para el ajuste adecuado de los Controladores.

En el Capítulo IV, figuran los Errores propios de los Instrumentos, un Sistema General de Calibración y una Descripción de los Instrumentos de Comprobación ó Patrones utilizados.

En el Capítulo V, figuran algunas Aplicaciones Típicas en la Industria para presentar a el Lector de este Trabajo, ejemplos que le permitan hacerse una idea de las múltiples Aplicaciones de los Instrumentos y su papel dentro de el Proceso.

Finalmente, se presentan las conclusiones al trabajo; que son el resultado de todo el análisis que se desarrolló en la realización del presente volumen.

## OBJETIVO GENERAL

Establecer y conocer los Principios de la Instrumentación Industrial; haciendo hincapié, en los esquemas típicos de Control y sus Aplicaciones en la Industria.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

1.- Conocer los Conceptos Básicos de el Control, la Terminología General de la Instrumentación y las clases de Instrumentos.

2.- Conocer los tipos de Transmisores que existen en el Mercado y los que se aplican a nivel Industrial.

3.- Conocer el Concepto de Regulación Automática, las Características de el Proceso y los diferentes Sistemas de Control que existen y son aplicables a nivel Industrial.

4.- Conocer el Concepto de Calibración de un Instrumento, la Definición de Error de los Instrumentos y el Proceso General de Calibración de los Instrumentos aplicables a nivel Industrial.

5.- Conocer la Aplicación Industrial que se tiene de los Esquemas Típicos de Control analizados en los objetivos anteriores, y dar los Fundamentos de el Control de Procesos.

## CAPÍTULO I

### GENERALIDADES DE LA INSTRUMENTACIÓN

#### *1.1.- Definiciones en Instrumentación.*

Los Instrumentos de Control empleados en las Industrias de Proceso tales como la: Química, Petroquímica, Alimenticia, Metalúrgica, Energética, Textil, Papel, etcétera; tienen su propia Terminología; los términos empleados definen las características propias de Medida y de Control, y las Estáticas y Dinámicas de los diversos Instrumentos utilizados: Indicadores, registradores, controladores, transmisores y válvulas de control.

La terminología empleada se ha unificado con el fin de que los Fabricantes, los Usuarios y los Organismos ó Entidades que intervienen directa ó indirectamente en el campo de la Instrumentación Industrial empleen el mismo lenguaje. Las definiciones de los términos empleados se relacionan con las sugerencias hechas por la SAMA (*Scientific Apparatus Makers Association*), en su Norma PMC20; y son los siguientes:

1.- Campo de Medida (Range).- Espectro ó conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida ó de transmisión del instrumento; viene expresado estableciendo los dos valores extremos.

2.- Alcance (Span).- Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento.

3.- Error (Error).- Es la diferencia algebraica entre el valor leído ó transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida. Si el proceso está en condiciones de régimen permanente, existe el llamado "*error estático*".

En condiciones dinámicas, el error varía considerablemente debido a que los instrumentos tienen características comunes a los sistemas físicos: Absorben energía del Proceso y esta transferencia requiere cierto tiempo para ser transmitida, lo cual da lugar a retardos en la lectura del aparato. Siempre que las condiciones sean dinámicas, existirá en mayor ó menor grado el llamado "*error dinámico*" (diferencia entre el valor instantáneo de la variable y el indicado por el instrumento): Su valor depende del tipo de fluido del Proceso, de su velocidad, del elemento primario (termopar, bulbo y capilar), de los medios de protección (vaina), etcétera. El "*error medio*" del instrumento es la media aritmética de los errores en cada punto de la medida determinados para todos los valores crecientes y decrecientes de la variable medida.

4.- Precisión (Accuracy).- La precisión es la tolerancia de medida ó de transmisión del instrumento y define los límites de los errores cometidos cuando el instrumentos se emplea en condiciones normales de Servicio. Hay varias formas para expresar la precisión:

a).- Tanto por ciento del alcance.

b).- Directamente, en unidades de la variable medida. Ejemplo; precisión.

c).- Tanto por ciento de la lectura efectuada. Ejemplo; precisión.

d).- Tanto por ciento del valor máximo del campo de medida. Ejemplo; precisión.

e).- Tanto por ciento de la longitud de la escala.

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

Por ejemplo; un termómetro de  $0 - 150^{\circ}\text{C}$  y de  $\pm 1\%$  de precisión situado en un baño de temperatura constante a  $80^{\circ}\text{C}$ , puede ser calibrado a este valor, de modo que su precisión en este punto de trabajo será la máxima que se pueda obtener con un termómetro patrón. Es obvio, que para los valores restantes, en particular los correspondientes a los extremos de la escala, la precisión se apartará de  $\pm 1\%$ .

Hay que señalar que los valores de precisión de un instrumento se consideran en general establecidos para el usuario; es decir, son los proporcionados por los fabricantes de los instrumentos. Sin embargo, estos últimos suelen considerar también los valores de calibración en fábrica y de inspección. Por ejemplo; un instrumento que en fábrica tiene una precisión de calibración de  $\pm 0.8\%$ , en inspección le corresponde  $\pm 0.9\%$  y la dada al usuario es  $\pm 1\%$ . Con ello se pretende tener un margen de seguridad para compensar los efectos de las diferencias de apreciación de las personas que efectúan la calibración, las diferentes precisiones de los instrumentos de medida utilizados, las posibles alteraciones debidas al desplazamiento del instrumento de un punto a otro, los efectos ambientales y de envejecimiento, etcétera.

5.- Zona muerta (Dead zone ó dead band).- Es el campo de valores de la variable que no hace variar la indicación ó la señal de salida del instrumento; es decir, que no produce su respuesta. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida.

6.- Sensibilidad (Sensitivity).- Es la razón entre el incremento de la lectura y el incremento de la variable que lo ocasiona, después de haberse alcanzado el estado de reposo. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida. Hay que señalar que no debe confundirse la sensibilidad con el término de zona muerta; son definiciones básicamente distintas que antes era fácil confundir cuando la definición inicial de la sensibilidad era “valor mínimo en que se ha de modificar la variable para apreciar un cambio medible en el índice ó en la pluma de registro del instrumento”.

7.- Repetibilidad (Repeatability).- La repetibilidad es la capacidad de reproducción de las posiciones de la pluma ó del índice del instrumento al medir repetidamente valores idénticos de la variable en las mismas condiciones de Servicio y en el mismo sentido de variación, recorriendo todo el campo. Se considera en general su valor máximo (repetibilidad máxima) y se expresa en tanto por ciento del alcance; un valor representativo es el de  $\pm 0.1\%$ .

8.- Histéresis (Hysteresis).- La histéresis es la diferencia máxima que se observa en los valores indicados por el índice ó la pluma del instrumento para el mismo valor cualquiera del campo de medida, cuando la variable recorre toda la escala en los dos sentidos, ascendente y descendente. Se expresa en tanto por ciento del alcance de la medida.

9.- Otros términos empleados en las especificaciones de los instrumentos son los siguientes:

a).- Campo de medida con elevación de cero.- Es aquel campo de medida en el que el valor cero de la variable ó señal medida es mayor que el valor inferior del campo.

b).- Campo de medida con supresión de cero.- Es aquel campo de medida en el que el valor cero de la variable ó señal medida es menor que el valor inferior del campo.

c).- Elevación de cero.- Es la cantidad con que el valor cero de la variable supera el valor inferior del campo. Puede expresarse en unidades de la variable medida ó en % del alcance.

d).- Supresión de cero.- Es la cantidad con que el valor inferior del campo supera el valor cero de la variable. Puede expresarse en unidades de la variable medida ó en % del alcance.

e).- Deriva.- Es una variación en la señal de salida que se presenta en un período de tiempo determinado mientras se mantienen constantes la variable medida y todas las condiciones ambientales. Se suelen considerar la deriva de cero (variación en la señal de salida para el valor cero de la medida atribuible a cualquier causa interna), y la deriva térmica de cero (variación en la señal de salida a medida cero, debida a los efectos únicos de la temperatura).

La deriva está expresada usualmente en porcentaje de la señal de salida de la escala total a la temperatura ambiente, por unidad, ó por intervalo de variación de la temperatura. Por ejemplo, la deriva térmica de cero de un instrumento en condiciones de temperatura ambiente durante 1 mes fue de 0.2% del alcance.

f).- Fiabilidad.- Medida de la probabilidad de que un instrumento continúe comportándose dentro de límites especificados de error a lo largo de un tiempo determinado y bajo condiciones especificadas.

g).- Resolución.- Magnitud de los cambios en escalón de la señal de salida (expresados en tanto por ciento de la salida de toda la escala), al ir variando continuamente la medida en todo el campo. Es también el grado con que el instrumento puede discriminar valores equivalentes de una cantidad.

h).- Resolución infinita.- Capacidad de proporcionar una señal de salida progresiva y continua en todo el campo de trabajo del instrumento.

i).- Ruido.- Cualquier perturbación eléctrica ó señal accidental no deseada que modifica la transmisión, indicación ó registro de los datos deseados.

j).- Linealidad.- La aproximación de una curva de calibración a una línea recta especificada.

k).- Linealidad basada en puntos.- Falta de linealidad expresada en forma de desviación máxima con relación a una línea recta que pasa a través de los puntos dados correspondientes al cero y al 100% de la variable medida.

l).- Estabilidad.- Capacidad de un instrumento para mantener su comportamiento durante su vida útil y de almacenamiento especificadas.

m).- Temperatura de servicio.- Campo de temperaturas en el cual se espera que trabaje el instrumento dentro de límites de error especificados.

n).- Vida útil de servicio.- Tiempo mínimo especificado durante el cual se aplican las características de servicio continuo e intermitente del instrumento sin que se presenten cambios en su comportamiento más allá de tolerancias especificadas.

o).- Reproducibilidad.- Capacidad de reproducción de un instrumento de las medidas repetitivas de la lectura ó señal de salida para el mismo valor de la variable medida alcanzado en ambos sentidos, en las mismas condiciones de Servicio y a lo largo de un período de tiempo determinado. Por ejemplo; un valor representativo sería  $\pm 0.2\%$  del alcance de la lectura ó señal de salida a lo largo de un período de 30 días.

p).- Respuesta frecuencial.- Variación con la frecuencia de la relación de amplitudes de la señal de salida/variable medida (y de la diferencia de fases entre la salida y la variable medida), para una medida de variación senoidal aplicada a un instrumento dentro de un campo establecido de frecuencias de la variable medida. Se especifica usualmente como “dentro de  $\pm$  ... % de ... a ... Hz”.

## 1.2.- Definiciones en Control.

1.- Planta.- Una planta es un equipo, quizá simplemente un juego de piezas de una máquina funcionando juntas, cuyo objetivo es realizar una operación determinada.

2.- Procesos.- Se define como una operación ó desarrollo natural, progresivamente continua, caracterizada por una serie de cambios graduales que llevan de una a otra de un modo relativamente fijo y que tienden a un determinado resultado ó final; ó una operación artificial ó voluntaria, progresivamente continua que consiste en una serie de acciones controladas ó movimientos dirigidos sistemáticamente hacia determinado resultado ó fin. Es decir, un proceso es cualquier operación que se va a controlar y éstos pueden ser químicos, económicos ó biológicos.

3.- Sistemas.- Un sistema es una combinación de componentes que actúan conjuntamente y cumplen determinado objetivo. Un sistema no está limitado a los objetivos físicos. El concepto de sistema puede ser aplicado a fenómenos abstractos y dinámicos, como son los de la Economía. Por tanto, hay que interpretar el término "*Sistema*" como referido a Sistemas Físicos, Biológicos, Económicos, etcétera.

4.- Perturbaciones.- Una perturbación es una señal que tiende a afectar adversamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema, se la denomina interna; mientras una perturbación externa se genera fuera del sistema y constituye una entrada.

5.- Control de realimentación.- Control de realimentación es una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida y la entrada de referencia de un sistema (ó un estado deseado, arbitrariamente variado), y que lo hace sobre la base de esta diferencia. Aquí solamente se consideran perturbaciones a las no previsibles (es decir, las desconocidas de antemano), pues para las que pueden ser predichas ó conocidas siempre se puede incluir una compensación dentro del sistema de modo que sean necesarias las mediciones.

6.- Sistemas de control realimentado.- Es aquel que tiende a mantener una relación preestablecida entre la salida y la entrada de referencia, comparando ambas y utilizando la diferencia como parámetro de control. Es de notar que los sistemas de control realimentado, no están limitados al campo de la Ingeniería; sino que se los puede encontrar en áreas ajenas a la misma, como la Economía y la Biología. Por ejemplo, el organismo humano, en un aspecto, es análogo a una intrincada Planta Química con una enorme variedad de operaciones unitarias. El control de procesos de esta red de transporte y reacciones químicas involucra una variedad de lazos de control. De hecho, el organismo humano es un sistema de control realimentado extremadamente complejo.

7.- Servomecanismos.- Un servomecanismo es un sistema de control realimentado en el cual la salida es alguna posición de velocidad ó aceleración mecánica. Por tanto, los términos “sistema de control de servomecanismo ó de posición (ó de velocidad ó de aceleración)”, son sinónimos. Los servomecanismos son extensamente usados en la Industria Moderna. Por ejemplo, el funcionamiento totalmente automatizado de Máquinas-Herramienta, con su instrucción programada; son cumplidos por el uso de servomecanismos.

8.- Sistemas de regulación automática.- Es un sistema de control realimentado en el que la entrada de referencia ó la salida deseada son ó bien constantes ó varían lentamente en el tiempo, y donde la tarea fundamental consiste en mantener la salida en el valor deseado a pesar de las perturbaciones presentes. Un sistema de calefacción domiciliario en el que un termostato es el control, constituye un ejemplo de sistema de regulación automático.

En este sistema, se compara el ajuste del termostato (la temperatura deseada) con la temperatura efectiva de la habitación. Una perturbación en este sistema la constituye un cambio en la temperatura exterior. El objetivo es mantener la temperatura deseada en la habitación a pesar de las variaciones en la temperatura exterior.

9.- Sistemas de control de procesos.- Un sistema de regulación automático en el que la salida es una variable como temperatura, presión, flujo, nivel de líquido ó pH; se llama sistema de control de procesos. El control de procesos tiene amplia aplicación en la Industria. Frecuentemente, se usan en estos sistemas controles programados como el de temperatura de un horno de calentamiento en que la temperatura del horno es controlada de acuerdo con un programa preestablecido.

Por ejemplo; el programa preestablecido puede consistir en elevar la temperatura a determinado valor durante determinado intervalo de tiempo, y luego reducir a otra temperatura prefijada también durante un período de tiempo prefijado. En un programa como este, el punto de ajuste varía de acuerdo con un cronograma preestablecido. Entonces el control funciona para mantener la temperatura del horno cerca del punto fijado, variable. Se hace notar que la mayoría de los sistemas de control incluyen servomecanismos como parte integral.

10.- Sistema de control de lazo cerrado.- Es aquel en el que la señal de salida tiene efecto directo sobre la acción de control. Esto es, los sistemas de control de lazo cerrado son sistemas de control realimentado. La señal de error actuante, que es la diferencia entre la señal de entrada y la de realimentación (que puede ser la señal de salida ó una función de la señal de salida y sus derivadas), entra al detector ó control de manera de reducir el error y llevar la salida del sistema al valor deseado. En otras palabras, el término "lazo cerrado" implica el uso de acción de realimentación para reducir el error del sistema.

11.- Sistemas de control de lazo abierto.- Son sistemas de control en los que la salida no tiene efecto sobre la acción de control. Es decir, en un sistema de control de lazo abierto la salida ni se mide, ni se realimenta para comparación con la entrada. En un sistema de control de lazo abierto cualquiera, no se compara la salida con la entrada de referencia. Por tanto, para cada entrada de referencia corresponde una condición de operación fijada. Así, la exactitud del sistema depende de la calibración. (Los sistemas de control de lazo abierto deben ser cuidadosamente calibrados, y para que sean útiles deben mantener esa calibración). En presencia de perturbaciones, un sistema de control de lazo abierto no cumple su función asignada. En la práctica, sólo se puede usar el control de lazo abierto si la relación entre la entrada y la salida es conocida, y si no hay perturbaciones ni internas ni externas. Estos sistemas claramente no son sistemas de control realimentado.

### *1.3.- Clases de Instrumentos.*

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 de el Proceso.

#### *1.3.1.- En función del Instrumento.*

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

1.- Instrumentos "ciegos" (fig. I.1), son aquellos que no tienen indicación visible de la variable. Hay que hacer notar que son "ciegos" los instrumentos de alarma, tales como presóstatos 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 ó conmutador al cruzar la variable el valor seleccionado. Son también instrumentos ciegos, los transmisores de caudal, presión, nivel y temperatura sin indicación.

2.- Instrumentos “indicadores” (fig. I.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.

3.- Instrumentos “registradores” (fig. I.3) registran con trazo continuo ó a puntos la variable, y pueden ser circulares ó de gráfico rectangular ó alargado según sea la forma del gráfico. Los registradores de gráfico circular suelen tener el gráfico de una revolución en 24 horas, mientras que en los de gráfico rectangular la velocidad normal del gráfico es de 20 mm/hora..

4.- Los “Elementos Primarios” (fig. I.4) están en contacto con la variable y utilizan ó 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, etcétera. 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.

5.- Los Instrumentos “transmisores” (fig. I.5) captan la variable de proceso a través del elemento primario y la transmiten a distancia en forma de señal neumática de margen de 3 a 5 lb/pulgada cuadrada ó electrónica de 4 a 20 mA de Corriente Continua. El elemento primario puede formar ó no parte integral del transmisor; el primer caso lo constituye un transmisor de temperatura de bulbo y capilar, y el segundo un transmisor de caudal con la placa-orificio como elemento primario. Los transductores reciben una señal de entrada, función de una ó más cantidades físicas y la convierten modificada ó 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), etcétera.

6.- Los Instrumentos “convertidores” (fig. I.6), son aparatos que reciben una señal de entrada neumática (3 a 5 lb/pulgadas cuadradas) ó electrónica (4 a 20 mA), 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.

7.- Los instrumentos “receptores”, reciben las señales procedentes de los transmisores y las indican ó registran. Los receptores controladores envían otra señal de salida normalizada a los valores ya indicados de 3 - 15 lb/pulgada cuadrada ó 4 - 20 mA en señal electrónica, que actúan sobre el elemento final de control.

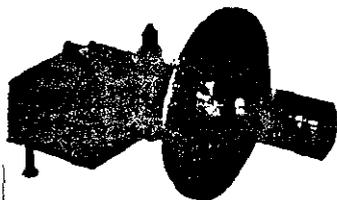
8.- Los Instrumentos “controladores” (fig. I.7), comparan la variable controlada (presión, nivel, temperatura), con un valor deseado y ejercen una acción correctiva de acuerdo con la desviación. La variable controlada la pueden recibir directamente como controladores locales ó bien indirectamente en forma de señal neumática ó electrónica procedente de un transmisor.

9.- El “elemento final de control” (fig. I.8), recibe la señal del controlador y modifica el caudal del fluido ó agente de control. En el control neumático, el elemento suele ser una válvula neumática ó un servomotor neumático que efectúan su carrera completa de 3-5 lb/pulgada cuadrada. En el control electrónico la válvula ó el servomotor anteriores son accionados a través de un convertidor de intensidad a presión (I/P) que convierte la señal electrónica de 4-20 mA a neumática 3-15 lb/pulgada cuadrada. 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 controlados de silicio (tiristores). Estos 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.

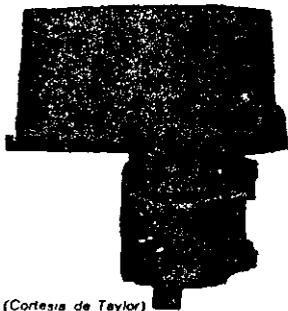
### *1.3.2.- En Función de la Variable de Proceso.*

De acuerdo con la Variable de el 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, etcétera. 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.

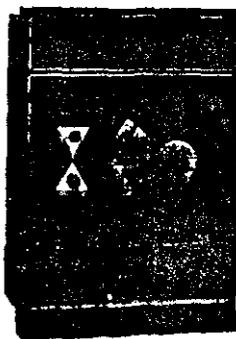
Si bien, al ser receptor neumático se le puede considerar instrumento de presión, caudal, nivel ó cualquier otra variable; según fuera la señal medida por el transmisor correspondiente; un registrador potenciométrico puede ser un instrumento de temperatura, de conductividad ó de velocidad, según sean las señales medidas por los elementos primarios de termopar, electrodos ó dínamo. Así mismo, 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 - 20 mA, un receptor controlador con salida de 4 - 20 mA, un convertidor intensidad/presión (I/P) que transforma la señal de 4 - 20 mA a neumática de 3-15 lb/pulgada cuadrada, 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, etcétera.



(Cortesia de Siemens)



(Cortesia de Taylor)

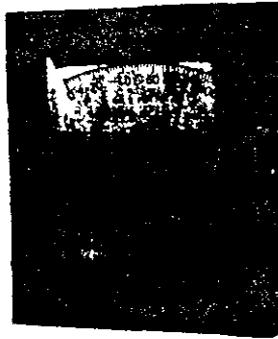


(Cortesia de Beckman)

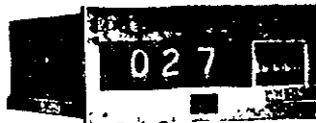
Fig. I.1.- Instrumentos Ciegos.



(Cortesía de Bourdon)

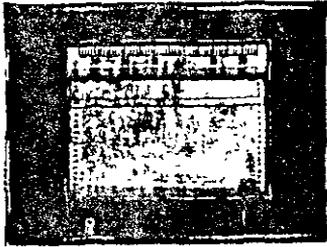


(Cortesía de Foxboro)

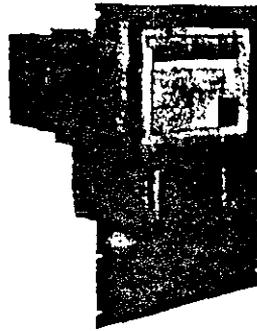


(Cortesía de Bourdon)

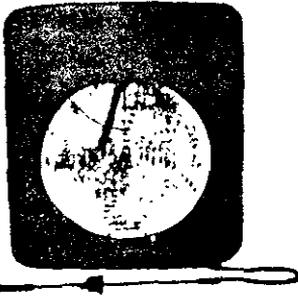
Fig. I.2.- Instrumentos Indicadores.



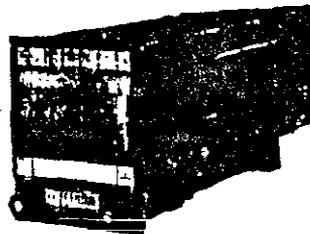
*(Cortesia de Honeywell)*



*(Cortesia de Leeds & Northrup)*



*(Cortesia de Foxboro)*



*(Cortesia de Siemens)*

Fig. I.3.- Instrumentos Registradores.

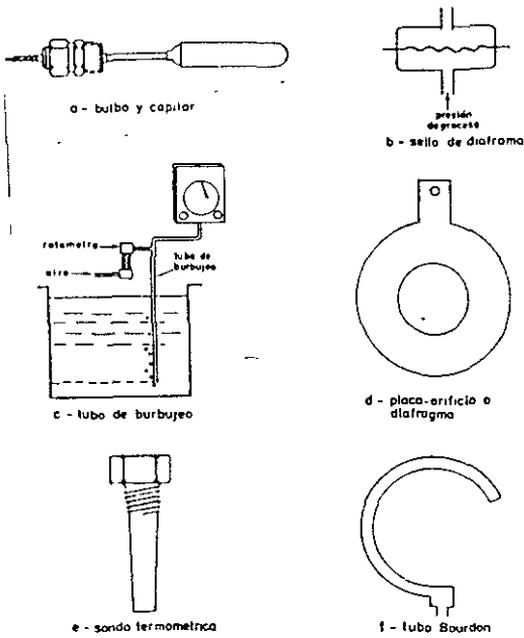
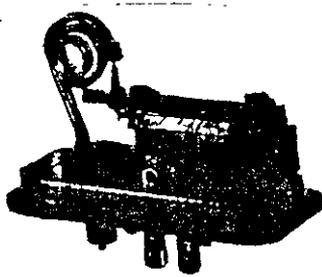


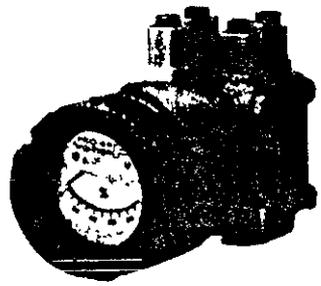
Fig. I.4.- Elementos Primarios.



*(Cortesia de Kent)*

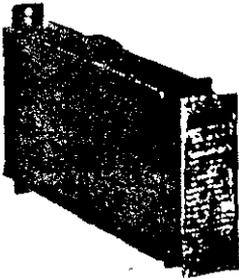


*(Cortesia de Siemens)*

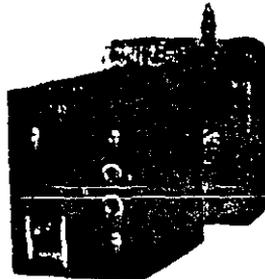


*(Cortesia de Fischer Porter)*

Fig. I.5.- Instrumentos Transmisores.



*(Cortesía de Eckerdt)*

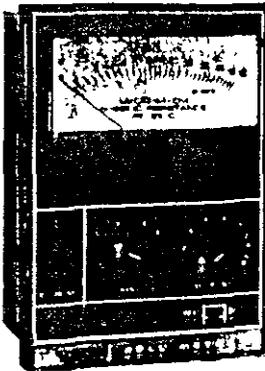


*(Cortesía de Fischer Porter)*

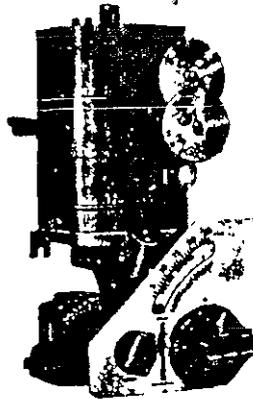
Fig. I.6.- Instrumentos Convertidores.



(Cortesía de Foxboro)

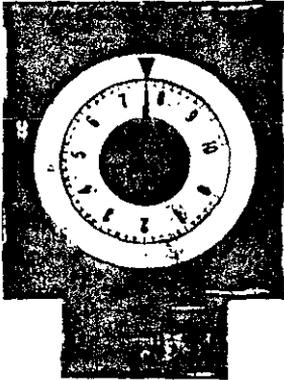


(Cortesía de Beckman)



(Cortesía de Fischer Porter)

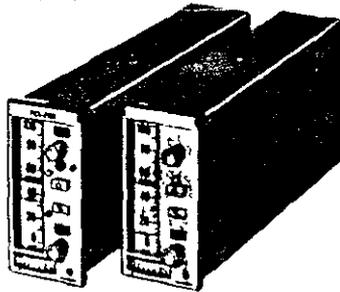
Fig. I.7.- Instrumentos Controladores.



(Cortesía de Honeywell)



(Cortesía de Fischer Porter)

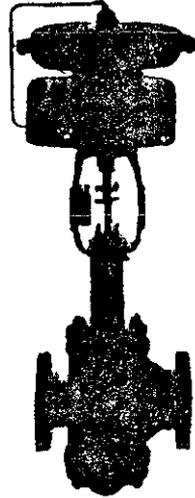


(Cortesía de Eckardt)

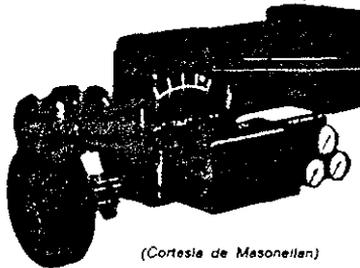
Fig. I.7.- Instrumentos Controladores (Continuación).



(Cortesia de Guide)



(Cortesia de Masoneilan)



(Cortesia de Masoneilan)

Fig. I.8.- Elemento Final de Control.

## CAPÍTULO II

### ELEMENTOS TRANSMISORES

#### *II.1.- Generalidades.*

Los transmisores son instrumentos que captan la variable de proceso y la transmiten a distancia a un instrumento receptor indicador, registrador, controlador ó una combinación de éstos. Existen varios tipos de señales de transmisión: Neumáticas, electrónicas, hidráulicas y telemétricas. Las más empleadas en la Industria son las dos 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.

Los transmisores neumáticos generan una señal neumática variable linealmente de 3 - 15 lb/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), y ha sido adoptada en general por los fabricantes de transmisores y controladores neumáticos en Estados Unidos de América.

En los Países que utilizan el Sistema Métrico Decimal, se emplea además la señal 0.2 - 1.0 kg/centímetro cuadrado, que es equivalente aproximadamente a 3 - 15 lb/pulgada cuadrada.

El alcance de esta señal métrica es un 5% más corto que la señal de 3 - 15 lb/pulgada cuadrada; por lo cual, la adopción en una Planta Industrial de una ú otra Norma obliga a calibrar con la misma señal adoptada el conjunto completo transmisor, controlador, válvula de control, y todos los instrumentos accesorios que se utilicen (extractores de raíz cuadrada, Ordenadores neumáticos, posicionadores, etcétera).

Nótese que en las válvulas de control, pueden emplearse señales neumáticas de 0.6 - 1.4; de 0.4 - 2.0 ó de 0.8-2.4 Kg/centímetro cuadrado; gracias a la función de conversión de la señal de entrada 3 - 15 lb/pulgada cuadrada, que puede realizar el posicionador acoplado a la válvula ó bien mediante resortes especiales dispuestos en el servomotor de la válvula.

Los transmisores electrónicos generan varios tipos de señales: 4 - 20mA; 1 - 5mA; 10 - 50mA; 0 - 5 mA; 1 - 5mA; 0 - 20mA; 1 - 5 V. Entre estas señales, las más empleadas son 4 - 20mA; 10 - 50mA y 0 - 20mA y en panel 1 - 5 V. Debe señalarse que esta discrepancia entre los distintos fabricantes hace que algunos tipos de instrumentos estén preparados para un fácil cambio del valor de la corriente de salida. La señal electrónica de 4 - 20mA tiene un nivel suficiente y de compromiso entre la distancia de transmisión y la robustez del equipo. Al ser corriente continua y no corriente alterna, elimina la posibilidad de captar perturbaciones, está libre de corrientes parásitas, emplea sólo dos hilos que no precisan blindaje y permite actuar directamente sobre miliamperímetros, potenciómetros, calculadores analógicos, etcétera; sin necesidad de utilizar rectificadores, ni modificar la señal.

La relación de 4 - 20mA es de 1 a 5 la misma que la razón de 3 - 15 lb/pulgada cuadrada 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 (4mA), 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 3 - 15 lb/pulgada cuadrada, y la electrónica de 4 - 20 mA.

Nótese que el nivel mínimo de la señal neumática de salida no es cero, sino que vale 3 lb/pulgada cuadrada. 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 de 1 lb/pulgada cuadrada está descalibrado; si el nivel estándar mínimo de salida fuera de 0 lb/pulgada cuadrada no sería posible esta comprobación rápida y para efectuarla habría que aumentar la temperatura hasta detectar presión en la salida.

Así mismo, cuando el conducto neumático que llega hasta el receptor se perfora por accidente, la señal neumática puede llegar a anularse, facilitándose la detección de la avería por la lectura del instrumento receptor (en el ejemplo anterior, si el receptor fuera un manómetro de márgen 3 - 15 lb/pulgada cuadrada, con graduación 0 - 150°C el índice señalaría un valor inferior al cero del instrumento).

## II.2.- Transmisores Neumáticos.

### II.2.1.- Bloque Amplificador de una y dos Etapas.

Los transmisores neumáticos se basan en el Sistema tobera-obturador que convierte el movimiento del elemento de medición en una señal neumática. El Sistema tobera-obturador consiste en un tubo neumático alimentado a una Presión constante  $P_s$ , con una reducción en su salida en forma de

s

tobera, la cual puede ser obstruida por una lamina llamada obturador cuya posición depende del elemento de medida. En la fig. II.1 se presenta el conjunto.

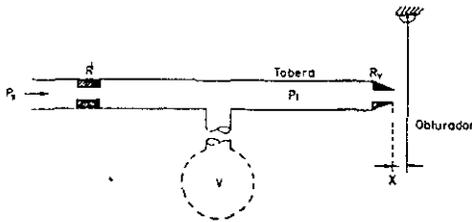


Fig. II.1.- Sistema Tobera-Obturador.

El aire de alimentación de presión normalizada 1.4 kg/centímetro cuadrado (20 lb/pulgada cuadrada), pasa por la restricción R y llena el volumen cerrado V escapándose a la atmósfera por la tobera R. Ésta tiene un

diámetro muy pequeño, de unos 0.25 a 0.50 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 kg/centímetro cuadrado lo cual indica que la relación de presiones diferenciales a través de la restricción R es de  $1.4/0.03 \div 50$  veces. El consumo de aire del conjunto tobera-obturador es relativamente pequeño, del orden de 3 NI/min.

El escape de aire a través de la tobera depende de la posición del obturador, es decir, del valor de  $x$ . Debido a este escape, el volumen V se encuentra a una presión P

intermedia entre P<sub>1</sub> y la Presión Atmosférica.

En efecto: Para  $x = 0$  el obturador tapa casi totalmente la tobera, con lo cual no hay escape de aire a la atmósfera y P<sub>1</sub> llega a ser casi igual a la

Presión P<sub>s</sub>

del aire de alimentación: Para  $x$  relativamente grande el obturador está bastante separado de la tobera y no limita el escape a la atmósfera siendo la Presión P<sub>1</sub> muy próxima a la atmosférica.

1

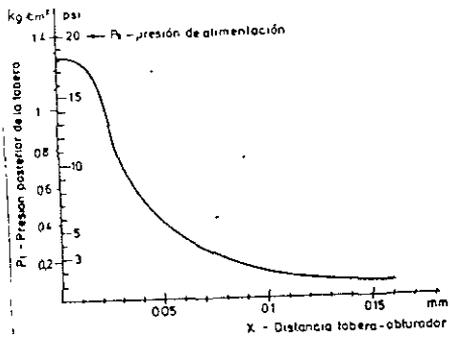


Fig. II.2.- Curva de Respuesta de un Sistema Tobera-Obturador.

En la Fig. II.2, se representa una Curva de Respuesta Típica de un Sistema tobera-obturador, donde se puede ver que la misma no es lineal. El aire que se escapa de la tobera ejerce una fuerza sobre el obturador  $F = P \cdot S$  que

1

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 - 0.2 mm (no se consideran diámetros más pequeños para evitar que la tobera se tape por suciedad del aire). De este modo, la parte reducida de la curva puede aproximarse a una línea recta con lo cual se consigue una relación prácticamente lineal entre el valor de la variable y la señal transmitida.

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.

Existen otros dos sistemas parecidos al conjunto tobera-obturador, cuyo objetivo es compensar la fuerza que el aire que escapa de la tobera ejerce sobre el obturador. Estos sistemas están representados en la fig. II.3; puede observarse que el obturador tiene un movimiento longitudinal deslizándose entre dos toberas (fig. II.3a) ó bien entre una tobera de alimentación de aire y otra colectora (fig.II.3b). Existe muy poco juego entre el obturador y las toberas y las fuerzas que el aire de escape ejercen sobre el obturador se compensan totalmente en el sistema de la fig.II.3a, mientras que en el de la fig. II.3b queda todavía una fuerza residual que no obstante es muy pequeña y casi puede despreciarse (nótese que a un lado del obturador actúa la presión de alimentación mientras que en el otro lo hace la presión posterior a amplificar). Resumiendo, las características del sistema tobera-obturador son las siguientes:

1.- Gran sensibilidad. Basta un pequeño desplazamiento del orden de algunas micras del obturador para que la señal de salida varíe en toda la parte seleccionada de la curva característica. Es decir, el factor de conversión  $K = \frac{dp}{dx}$  es muy grande.

2.- El incremento  $\frac{dp}{dx}$  de la señal de salida es débil relativamente e insuficiente para aplicarlo a válvulas y pistones neumáticos.

3.- Los volúmenes de aire del sistema son reducidos limitando el volumen  $V$ . Esta limitación obliga a acoplar al sistema un amplificador neumático (relé piloto ó válvula piloto) formando así un amplificador de dos etapas (fig. II.4a).

En el caso de distancias cortas entre el transmisor y el receptor puede emplearse el amplificador de una sola etapa (fig. II.4b), en el cual, el conjunto tobera-obturador tiene las funciones de conversión y de alimentación de aire.

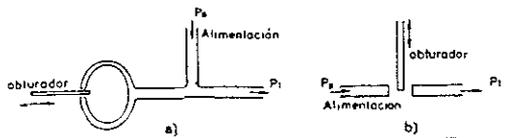


Fig. II.3.- Sistemas de Movimiento Longitudinal de la Tobera.

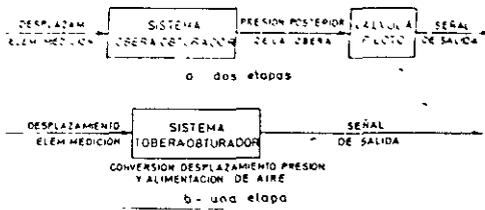


Fig. II.4.- Bloques Amplificadores.

El amplificador de una etapa se diferencia del de dos etapas en las siguientes características:

- 1.- Tobera y restricción mayores.
- 2.- Fuerza mayor en el obturador.
- 3.- Mayor influencia del elemento de medida.
- 4.- Obturador más pesado.
- 5.- Mayor consumo de aire.
- 6.- Menor peligro de obturación de la tobera.
- 7.- Mayor carrera del obturador.

La mayor válvula piloto (amplificador neumático) empleada en el amplificador de dos etapas cumple las siguientes funciones:

1.- Aumento del caudal de aire suministrado, ó del caudal de escape para conseguir tiempos de respuesta inferiores al segundo.

2.- Amplificación de presión (ganancia) que suele ser de 4 - 5, en general, para obtener así la señal neumática estándar 3 - 15 lb/pulgada cuadrada. La válvula piloto puede clasificarse en 2 tipos:

a).- Válvula piloto sin realimentación (de escape continuo).

b).- Válvula piloto con realimentación (sin escape continuo).

Las características principales de la primera válvula son:

1.- Consumo de aire para caudal nulo en la salida.- En las posiciones extremas de la válvula el consumo de aire es despreciable. El máximo corresponde aproximadamente a 20 litros por minuto.

2.- Características de caudal.- A un caudal nulo de escape corresponde aproximadamente un caudal de consumo de 20 litros por minuto a presión atmosférica. A un caudal nulo de alimentación corresponde un caudal de escape de 20 litros por minuto (aproximadamente).

En la fig. II.5 puede verse la característica de presión, el consumo de aire y el caudal de salida de estas válvulas piloto. En la válvula piloto con realimentación, sin escape continuo (fig. II.6), la presión posterior P

I

de la tobera actúa sobre la membrana de superficie S

I

mientras que la Presión de salida  $P_0$  lo hace sobre

la membrana  $S_2$ . El conjunto móvil de las dos membranas

tiende al equilibrio.

En la posición de equilibrio y ante un aumento de la presión posterior  $P_1$

de la tobera, el aire de alimentación entra en la válvula aumentando el valor de  $P_0$ . Por el

contrario, si  $P_1$  disminuye, el aire contenido en el receptor escapa a través del

orificio de escape, con lo cual  $P_0$  baja.

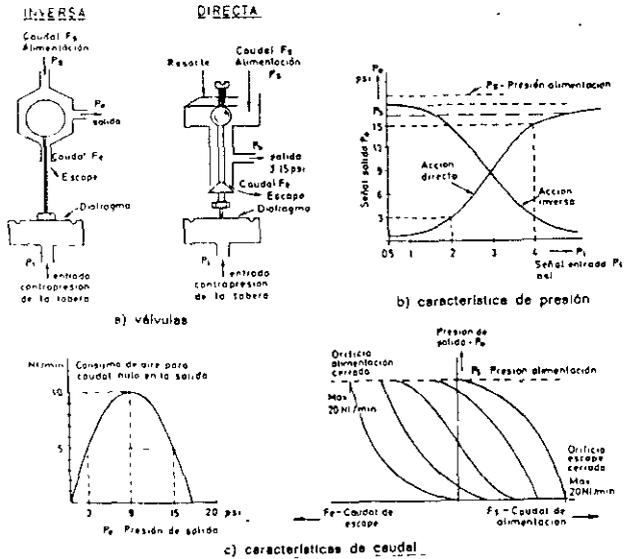


Fig. II.5.- Características de la Válvula Piloto sin Realimentación (Escape Continuo).

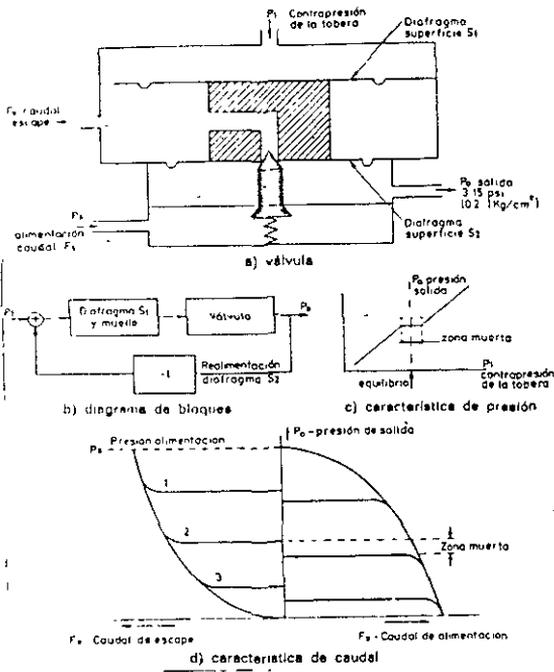


Fig. II.6.- Características de la Válvula Piloto con Realimentación (sin Escape Continuo).

Entre estas dos reacciones del sistema existe una zona muerta debida a la histéresis mecánica de las partes móviles que está representada en las Curvas Características de Presión y de Caudal de la válvula en las figuras II.6 c y d. Las características resumidas de la válvula piloto con realimentación comparadas con la de Escape Continuo son las siguientes:

- 1.- Un consumo de aire más bajo para el caudal nulo de salida ( 2 - 3 NI/min ).
- 2.- Un caudal mayor de salida hacia el receptor ( $\pm 40$ NI/min).
- 3.- Una zona muerta de presiones de salida.
- 4.- Son de equilibrio de fuerzas.
- 5.- Un sistema de realimentación, y por lo tanto, una menor resistencia interna, una menor dependencia del aire de alimentación y una ganancia más pequeña.
- 6.- Son de acción directa.

El sistema descrito, compuesto por el conjunto tobera-obturador y la válvula piloto presenta todavía las siguientes desventajas:

- 1.- Las variaciones en la presión del aire de alimentación influyen en la señal de salida.
- 2.- Las variaciones que pueden existir en el proceso influyen en el juego mecánico entre el obturador y el elemento de medida, y dan lugar a pulsaciones en la señal de salida, ya que el factor de amplificación del sistema tobera-obturador es muy grande.

Estos inconvenientes se evitan disminuyendo la ganancia del conjunto por realimentación negativa de la señal posterior de la tobera P sobre el

1

obturador. Se utilizan así tres sistemas de transmisión, el transmisor de equilibrio de movimientos, el de equilibrio de fuerzas y el de equilibrio de momentos.

## II.2.2.- Transmisor de Equilibrio de Movimientos.

El transmisor de equilibrio de movimientos (fig. II.7), 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.

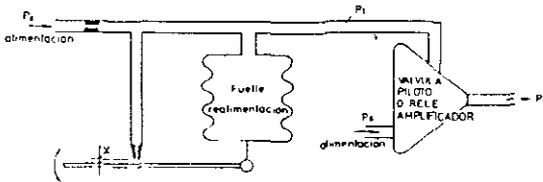


Fig. II.7.- Transmisor de Equilibrio de Movimientos.

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 ó bién a través de palancas con la suficiente fuerza para eliminar el error de histéresis que pudiera producirse. Si la fuerza disponible es 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.

### II.2.3.- Transmisor de Equilibrio de Fuerzas.

En la fig. II.8 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 se 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.

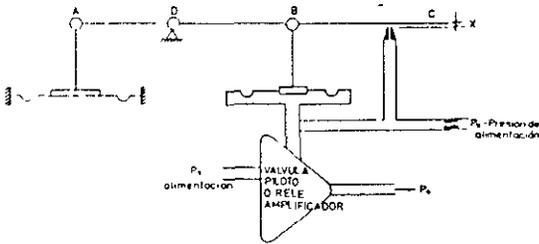


Fig. II.8.- Transmisor de Equilibrio de Fuerzas.

II.2.4.- *Transmisor de Equilibrio de Momentos.*

En el transmisor de equilibrio de momentos que puede verse en la fig. II.9 (transmisor de caudal), 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.

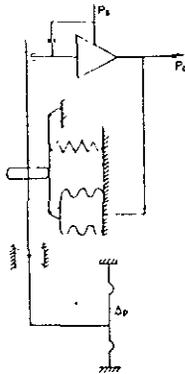


Fig. II.9.- Transmisor de Equilibrio de Momentos.

### *II.3.- Transmisores Electrónicos.*

#### *II.3.1.- Transmisores Electrónicos de Equilibrio de Fuerzas.*

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

1.- La fuerza ejercida por el elemento mecánico de medición (Tubo Bourdon, espiral, fuelle, etcétera).

2.- 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 ó un transformador diferencial. Un circuito oscilador asociado con cualquiera de estos detectores alimenta una unidad magnética y la fuerza generada reposiciona la barra de equilibrio de fuerzas. Se completa así un circuito de realimentación variando la corriente de salida en forma proporcional al intervalo de la variable de el Proceso.

### *II.3.1.1.- 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 rigidamente en el chasis del transmisor y contiene una bobina conectada a un circuito oscilador. Cuando aumenta ó disminuye el entrehierro, disminuye ó aumenta respectivamente la inductancia de la bobina detectora modulando la señal de salida del oscilador. En la fig. II.10a puede verse un diagrama de este tipo de instrumento.

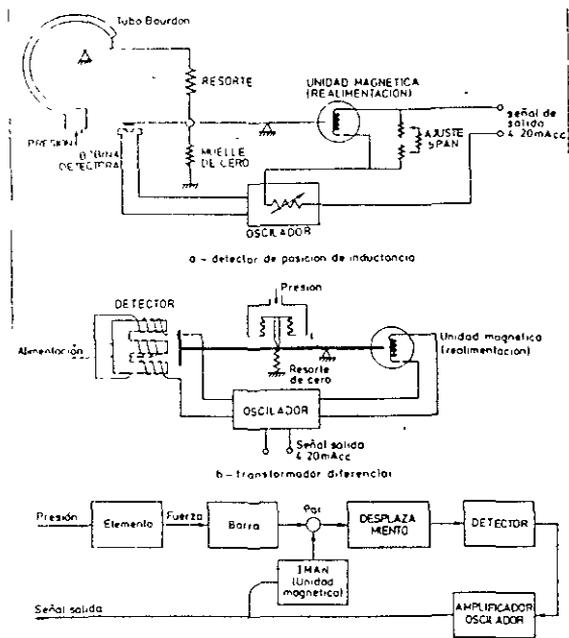


Fig. II.10.- Transmisor Electrónico de Equilibrio de Fuerzas.

### *II.3.1.2.- Transformador Diferencial.*

El Transformador Diferencial, consiste en un núcleo magnético con tres ó 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 entrehierro 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.

Los transductores electrónicos de equilibrio de fuerzas se caracterizan por tener un movimiento muy pequeño de la barra de equilibrio, poseen realimentación, una elasticidad muy buena y un nivel alto en la señal de salida. Por su constitución mecánica presentan un ajuste del cero y del alcance complicado, y una alta sensibilidad a vibraciones y su estabilidad en el tiempo, es de media a pobre. Su intervalo de medida corresponde al del elemento mecánico que utilizan (Tubo de Bourdon, espiral, fuelle, diafragma, etcétera), y su precisión es del orden de 0.5 - 1.0%. El transmisor electrónico descrito, es el utilizado como estándar en la transmisión de señales generales de el Proceso.

## CAPÍTULO III

### FUNDAMENTOS DE REGULACIÓN AUTOMÁTICA

#### *III.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 de el 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 de el 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.

### *III.2.- Características de el 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 la constituye un intercambiador de calor. El controlador permite al proceso cumplir su objetivo de transformación del material y realiza dos funciones esenciales:

a).- Compara la variable medida con la de referencia ó deseada (punto de consigna) para determinar el error.

b).- Estabiliza el funcionamiento dinámico del bucle de control mediante circuitos especiales para reducir ó eliminar el error.

Un circuito abierto de regulación carece de detector de señal de error y de controlador. Un ejemplo puede consistir en el calentamiento de agua en un tanque, por medio de un intercambiador de calor a resistencia eléctrica sumergido. Dada una tensión de alimentación, una temperatura de entrada del agua, unas condiciones externas y una demanda de agua constante, la temperatura de salida del agua permanecer constante. Si cambia cualquiera de estas condiciones, la temperatura de salida del agua debe variar.

Considerando ahora el control manual del proceso que servir de base para estudiar las características de el Proceso. Un 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.

Suponiendo que en estas condiciones, existiendo una temperatura constante en la salida, hay un aumento en el caudal del agua de entrada. Como la válvula de vapor sigue estando en la misma posición, el intercambiador no llegará a calentar el mayor caudal del agua fría de entrada, por lo cual, la temperatura de salida deberá disminuir. Ahora bien, debido a la inercia de el Proceso, pasará cierto tiempo hasta que el agua más fría sea sensada.

Cuando se nota la disminución de la temperatura, se debe comparar con la temperatura que se desea y calcular mentalmente cuántas vueltas debe dar la válvula de vapor y en qué sentido, debe hacerse una corrección manual, si se requiere. Se necesita cierto tiempo para llevar a cabo estas decisiones y corregir la posición de la válvula. También es cierto, que pasa cierto tiempo hasta que los efectos de corrección de la válvula, se notan en la temperatura de salida y pueden ser captados por el operador. Sólo entonces, éste es capaz de saber si su primera corrección ha sido escasa ó excesiva. En este punto, efectuar una segunda corrección, que al cabo de algún tiempo dará lugar a otro cambio de temperatura. El operador observará los resultados de esta segunda corrección y realizará una tercera, y así sucesivamente.

Esta serie de operaciones de medida, comparación, cálculo y corrección, constituyen una cadena cerrada de acciones y se realizan una y otra vez por el Operador, hasta que transcurre un cierto tiempo, la temperatura del agua se equilibra finalmente al vapor deseado por el operador; siempre que naturalmente no hayan cambiado las condiciones de el Proceso. El conjunto de elementos en circuito cerrado que hacen posible este control reciben el nombre de "Bucle, Lazo ó Anillo de Control" ("*Loop Control*").

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

a).- Los cambios en la variable controlada, debido a alteraciones en las condiciones de el Proceso y llamados generalmente, cambios de carga.

b).- El tiempo necesario para que la variable de el Proceso alcance un nuevo valor al ocurrir un cambio de carga. Este retardo se debe a una ó varias propiedades de el Proceso: Capacitancia, resistencia y tiempo de transporte. Los parámetros que regulan este retardo son los siguientes:

1.- Cambios de carga.- La carga de el Proceso es la cantidad total del fluido ó 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 cambio en la carga de el Proceso.

En general, los cambios de carga de el Proceso son debidos a las siguientes causas:

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

b). Variaciones en la calidad del fluido de control.- Una disminución de presión en el vapor 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.

c). Cambios a 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.

d). Calor generado ó absorbido por la reacción química de el Proceso (Proceso Exotérmico ó Endotérmico, respectivamente).- Se presenta un cambio de carga porque el Proceso necesita una menor ó 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 ó en los materiales de entrada en el Proceso. Por ejemplo, las variaciones en la presión de vapor ó en la apertura de la válvula de vapor, son perturbaciones en la alimentación de el Proceso.

Las perturbaciones en la demanda consisten en un cambio en la salida de energía ó de material de el Proceso. Los cambios en la temperatura del agua fría y las variaciones en el caudal de agua pertenecen a este tipo.

2.- Capacitancia.- La capacitancia de un Proceso es un factor muy importante en el Control Automático. Es una medida de las características propias de el Proceso para mantener ó transferir una cantidad de energía ó de material con relación a una cantidad unitaria de alguna variable de referencia. No debe confundirse con capacidad de el Proceso, que representa simplemente las características propias de almacenar energía ó material.

Por ejemplo, los dos depósitos de la fig. III.1a tienen la misma capacidad de 100 metros cúbicos, pero tienen distinta capacitancia por unidad de nivel: 12.5 metros cúbicos/metro, nivel el más alto y 25 metros cúbicos/metro, 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. 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.

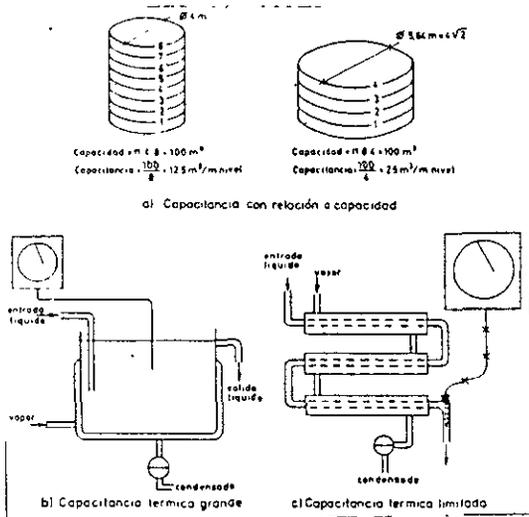


Fig. III.1.- Capacitancia.

En las figuras III.1b y c se pueden ver dos procesos con dos tipos de capacitancias térmicas, una grande y la otra limitada, respectivamente. En la fig. III.1b, el tanque contiene una gran cantidad de líquido, de tal modo que esta masa considerable de líquido, estabiliza y resiste los cambios que puedan causarse a la temperatura por variaciones y el caudal del líquido, en la presión del vapor ó en la temperatura ambiente. Estas mismas perturbaciones aplicadas al intercambiador de la fig. III.1c influyen poderosamente en la temperatura al ser pequeña la masa de 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.

3.- Resistencias.- La resistencia es la oposición total ó parcial de la transferencia de energía ó de material entre las capacitancias. En un intercambiador de calor, 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 en 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.

4.- Tiempo de transporte.- En el intercambiador de calor, si se disminuye la temperatura del agua de entrada, pasar cierto tiempo hasta que el agua más fría pueda circular a través del tanque y alcance la sonda termométrica. Hay que hacer notar que 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. En la fig. III.2, por ejemplo, si el agua circula con una velocidad de 1 m/s, con el bulbo a 3 metros del tanque, el tiempo de transporte es de 3 seg. Si el bulbo está en el punto B a 10 metros del tanque, el tiempo ser de 10 seg. Pero si la velocidad del agua es de 0.5 m/s el tiempo es de 6 y 20 seg., respectivamente.

La situación de la válvula de control puede contribuir también al tiempo muerto de transporte, en particular en el caso de un horno tubular empleado en la Industria Petroquímica en el que el aceite debe pasar a través de varios cientos de metros de tubería para atravesar totalmente el horno. El tiempo de transporte retarda la reacción de el Proceso, existiendo un tiempo muerto durante el cual el controlador no actúa ya que para iniciar una acción de corrección debe presentársele primero una desviación.

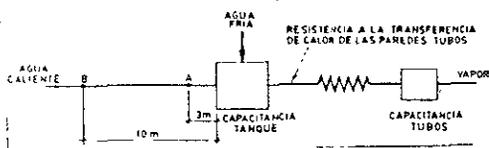


Fig. III.2.- Capacitancia, Resistencia y Tiempo de Transporte.

### *III. 3. - Sistemas de Control Neumáticos y Eléctricos.*

Se pueden emplear otros métodos ó combinaciones en la manipulación de la válvula. En los Sistemas Industriales se emplea uno ó una combinación de los siguientes Sistemas de Control:

- a). De Dos Posiciones (Todo-Nada).
- b). Proporcional de Tiempo Variable (Anticipatoria).
- c). Flotante.
- d). Proporcional.
- e). Proporcional+Integral.
- f). Proporcional+Derivada.
- g). Proporcional+Integral+Derivada.

### *III.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 fig. III.3 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. III.4), ó 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. 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 a el Proceso ligeramente superior e inferior respectivamente a las necesidades de la Operación Normal.

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.

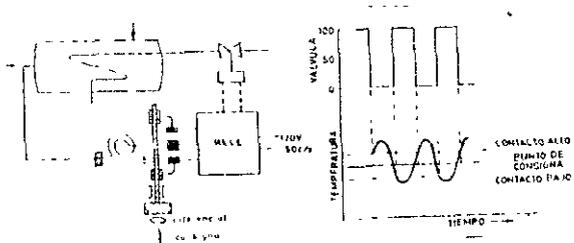


Fig. III.4.- Control Todo - Nada con Banda Diferencial ó Zona Muerta.

### III.3.2.- Control Flotante.

El Control Flotante, denominado realmente control flotante de velocidad constante (fig. III.5a), 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 ó más, desde la posición abierta a la cerrada ó viceversa).

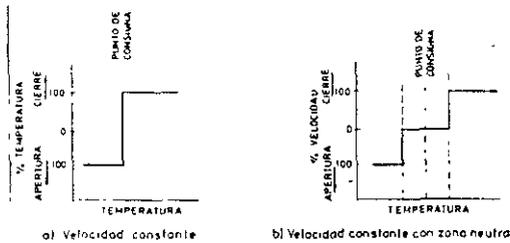


Fig. III.5.- Control Flotante.

El control flotante de velocidad constante con una zona neutra (fig. III.5b) se obtiene al acoplar a un Control Todo-Nada con una zona neutra una válvula motorizada reversible de baja velocidad. 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 ó de cierre.

El control flotante análogamente a el 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 de el Proceso. En general, la válvula debe moverse a una velocidad lo suficientemente rápida para mantener la variable ante los más rápidos cambios de carga que puedan producirse en el Proceso. La ventaja principal del control flotante, es que puede compensar los cambios de carga lentos de el Proceso desplazando gradualmente la posición de la válvula. Sin embargo, no es adecuado si hay un retardo importante ó si los cambios de carga, aunque sean pequeños, son muy rápidos.

### III.3.3.- Control Proporcional de Tiempo Variable.

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. La fig. III.6 muestra un ejemplo de este controlador que tiene un ciclo completo de 10 segundos y una banda proporcional de 20°C. En el punto de consigna, el controlador conecta el elemento final durante 5 segundos y lo 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 7.5 segundos, y así sucesivamente.

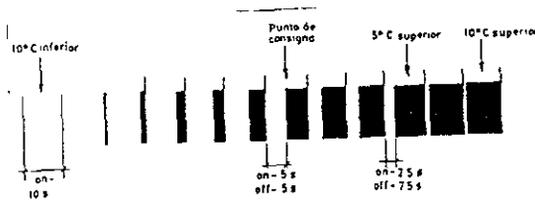


Fig. III.6.- Control Proporcional de Tiempo Variable.

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 ó un conjunto de resistencias de calefacción.

### III.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 fig. III.7, puede verse la forma en que actúa un controlador proporcional cuyo punto de consigna es  $150^{\circ}\text{C}$  y cuyo intervalo de actuación es de  $100\text{-}200^{\circ}\text{C}$ . Cuando la variable controlada está en  $100^{\circ}\text{C}$  ó menos, la válvula está totalmente abierta a  $200^{\circ}\text{C}$  ó más; está totalmente cerrada y entre  $100$  y  $200^{\circ}\text{C}$  la posición de la válvula es proporcional al valor de la variable controlada.

Por ejemplo, a  $125^{\circ}\text{C}$  está abierta en un 75% ; a  $150^{\circ}\text{C}$  es un 50%. En la fig. III.8, puede verse un controlador proporcional neumático típico compuesto de un comparador, un transductor y una realimentación. El comparador establece la diferencia ó señal de error entre la variable controlada y el valor deseado de la variable ó punto de consigna (desplazamiento del punto C a C' ó D a 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 P y a través del amplificador neumático, hace bajar P .

1

0

En el circuito de realimentación, el nuevo valor de la presión de salida P

0

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''. El resultado de esta serie de acciones es que a cada valor del error, la señal de salida P toma otro valor determinado.

0

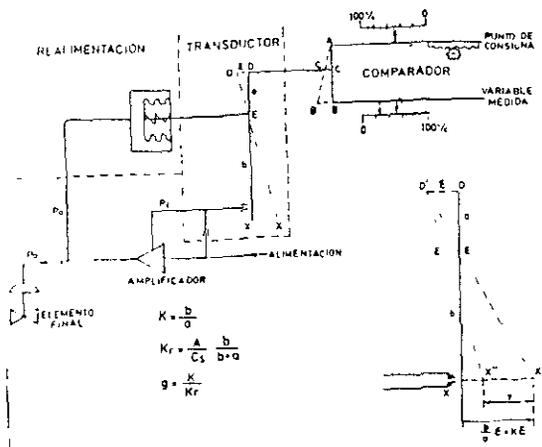


Fig. III.8.- Control Proporcional Típico.

Muchos controladores emplean en lugar de ganancia, la denominada banda proporcional que es la inversa de la ganancia:

$$BP \% = 100\% / K$$

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. Por ejemplo, si la escala del instrumento es 200°C, y se necesitan 50°C de cambio para provocar una carrera total de la válvula, el tanto por ciento de la banda proporcional es 50/200, ó sea, 25%. En los controladores prácticos, la banda proporcional puede variar desde 1 hasta 500% aproximadamente. En la fig. III.9, se explica claramente el concepto de banda proporcional en tanto por ciento. Nótese que la banda proporcional superior a 100% no puede causar una carrera total incluso para un cambio completo en la variable controlada.

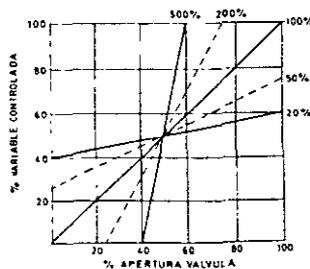


Fig. III.9.- Banda Proporcional.

El "offset" es una característica indeseable del control proporcional. En la fig. III.10 se indican los regímenes de carga, temperatura y la posición de la válvula de control para el intercambiador de calor. Inicialmente, el punto de consigna está en el valor deseado de 100°C. Al cabo de un tiempo se presenta un cambio de carga, originando, 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. Es obvio, que la temperatura final difiere de la primitiva, puesto que si así no fuera, por las características del control proporcional, la posición de la válvula sería inicial, lo cual es imposible, ya que en esta posición se ha presentado la disminución de temperatura inicial y existía el absurdo de mantener la misma temperatura de salida con la válvula de control en la misma posición dando el mismo paso de caudal de vapor, tanto para el consumo de agua caliente en el régimen inicial como para el aumento de este consumo.

La desviación puede eliminarse reajustando manualmente el punto de consigna. Hay que hacer notar que el control proporcional es un sistema de estabilización potente, capaz de ajuste y aplicación amplísima, pero tiene la característica indeseable del error de "offset".

### III.3.5.- Control Proporcional+Integral.

En el Control Integral, el elemento final se mueve de acuerdo con una función integral en el tiempo de la variable controlada. En la fig. III.11, puede verse un controlador neumático típico proporcional más integral.

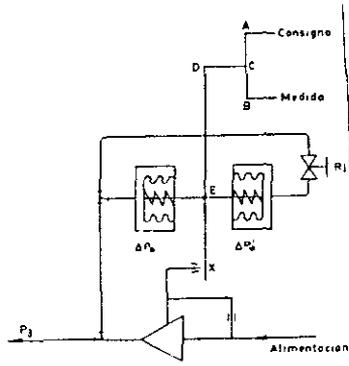


Fig. III.11.- Controlador Proporcional+Integral.

La combinación de la restricción  $R$  con la capacidad  $i$

del fuelle da lugar a una función de retardo con una constante de tiempo  $t$  (fig. III.12). 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:

$$P - P' = R * Q$$

siendo  $R$  la resistencia de la restricción. Este caudal introduce en el fuelle una cantidad de aire  $Qdt$  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 carga con una intensidad  $Q$  ante una diferencia de tensiones  $dP'$ .

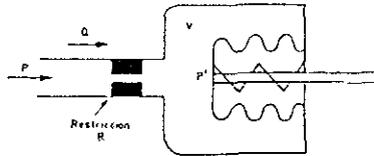


Fig. III.12.- Fuelle de Restricción.

Resumiendo: Ante un error E, la señal de salida P<sub>0</sub>

experimenta un salto inicial igual a la acción proporcional y a continuación sigue una variación gradual de presión a una velocidad proporcional al error y al grado de abertura de la restricción R<sub>i</sub>.

Del mismo modo que la acción proporcional se definía por la banda proporcional ó la ganancia, la acción integral viene definida por el denominado "tiempo de acción integral", que es el intervalo de tiempo en que, ante una señal de entrada en escalón, la parte de la señal de salida debida a la acción integral iguala a la parte debida a la acción proporcional. Es decir;

$$gE = (g) [1/t] E t$$

o            i o

$$t = t$$

i

Se define como "Banda Proporcional Inicial" (IPB), la correspondiente a un controlador PI con la realimentación anulada, es decir, con la restricción R<sub>i</sub> totalmente abierta con lo cual las acciones de los dos fuelles son

iguales y contrarias (fig. III.13). En este caso, el punto de unión de los dos fuelles con el obturador permanece fijo en el espacio, y el instrumento se comporta como un controlador Todo-Nada con ganancia igual a la del Transductor Tobera-Obturador+Amplificador.

El "offset" de alineación [alignment offset (AO)], es la diferencia entre el punto de consigna y el valor central de la Banda Proporcional Inicial (IPB). En la fig. III.13, puede verse el significado de este "offset", debiendo señalar que su origen puede provenir de una descalibración del instrumento, ó bien de una diferencia de áreas entre los dos fuelles, ó quizá de los resortes de los fuelles al tener constantes elásticas distintas.

Hay que señalar que los fabricantes de los instrumentos, prescriben un Sistema de Calibración del controlador, tal que con desviación cero, y con la Realimentación anulada la presión de salida es de 9 lb/pulgada cuadrada, es decir, la mitad del campo de medida de la señal de salida.

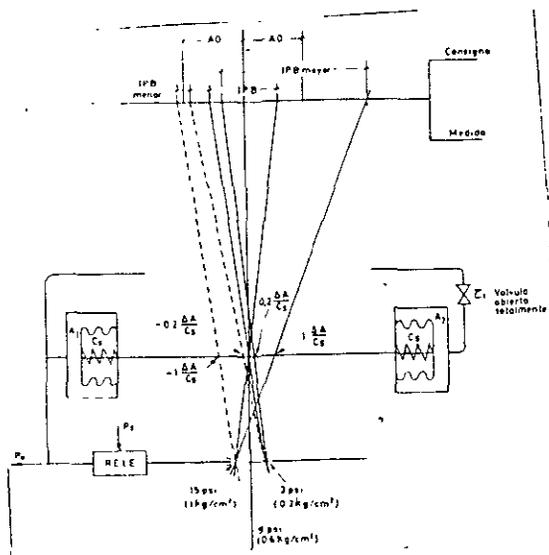


Fig. III.13.- Banda Proporcional Inicial (IPB) y Offset de Alineación (AO).

### III.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 fig. III.14, 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 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 fig. III.15, puede verse un Controlador Proporcional+Derivado (PD típico).

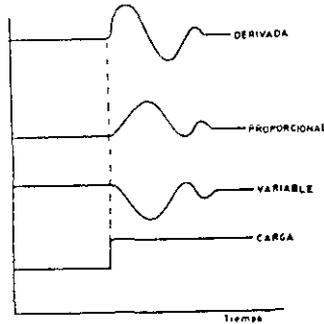


Fig. III.14.- Acción Derivada.

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. De este modo, si  $E = Ct$  resulta

$$gCt = g t_d C$$

luego  $t_d = t$

Se acostumbra a expresar la acción derivada en “*minutos de anticipo*” que presentan el tiempo en minutos con que la acción derivada se anticipa al efecto de la acción proporcional en el elemento final de control. Efectivamente, según se desprende en la fig. III.16, el “*tiempo de acción derivada*”  $t_d$  es

igual a los “*minutos de anticipo*”.

La comprobación del valor de la acción derivada puede llevarse a cabo, aplicando una entrada en rampa y registrando la señal de salida con el instrumento en bucle abierto, en la fig. III.16, puede verse la deducción gráfica de  $t_d$ .

La señal en rampa puede generarse en otro instrumento provisto de acción integral: El ajuste de su tiempo integral fija la pendiente de la señal en rampa inyectada. La acción derivada descrita en la fig. III.15, se aplica raramente debido a la respuesta violenta que se obtiene ante una entrada en escalón (la pendiente de una señal en escalón es infinita y la válvula recibe en un instante la señal máxima ó mínima, según la acción directa ó inversa del controlador).

Para evitar este inconveniente, se acude a la llamada acción derivada modificada que puede verse en las figuras III.17 y III.18: Los montajes con fuelle interno ó bién con fuelle externo se basan en atenuar los efectos de la restricción R causante de la respuesta violenta de la acción derivada clásica.

d

En la acción derivada modificada con fuelle interno, representada en la fig. III.17, parte del fuelle de Realimentación responde inmediatamente a las variaciones de la presión de salida y la parte restante actúa con retarde debido a la restricción R .

d

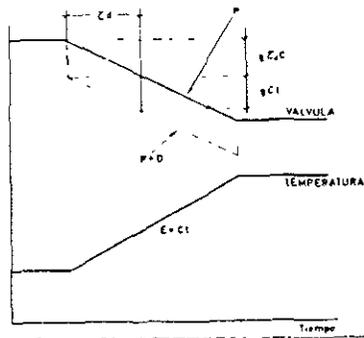


Fig. III.16.- Minutos de Anticipo de la Acción Derivada.

### III.3.7.- Control Proporcional+Integral-Derivado.

Un controlador PID neumático dispone de dos fuelles (Proporcional de Realimentación Negativa e Integral con Realimentación Positiva) y dos restricciones (Integral y Derivada).

Según la disposición de las restricciones se obtienen los tres controladores PID de las figs. III.19 a,b,c. El controlador PID de la fig. III.19a se llama simétrico y debe cumplir que  $R_i > R_d$  ya que en caso contrario la

Realimentación Positiva tendría preponderancia y daría lugar a un funcionamiento inestable. El instrumento de la fig. III.19 b es un PID asimétrico y el de la fig. III.19 c es un PID asimétrico con Realimentación Positiva, que no se utiliza en la práctica porque existe siempre la desigualdad

$$t_d > t_i .$$

Hay que señalar que un controlador neumático ideal sin interacción entre las acciones PID no existe. Se intentó hace tiempo, desarrollar un instrumento neumático de estas características, pero era demasiado complicado y la investigación no progresó. En electrónica sí es posible construir un instrumento PIB 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 ante un cambio brusco en el error.

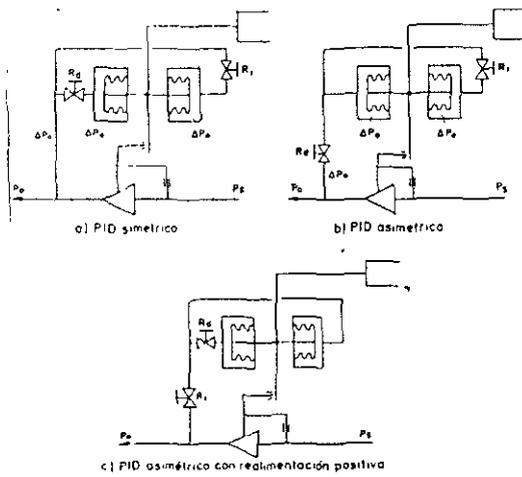


Fig. III.19.- Tipos de Controladores PID .

### III.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 de el Proceso. En los controladores neumáticos, este accesorio es un pequeño manoreductor, que en la posición "*manual*" desconecta previamente el propio controlador y acciona manualmente la válvula desde el propio instrumento. En "*automático*" el manoreductor 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 ó viceversa. 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 de el Proceso. El regulador manual (manoreductor) puede ser independiente del instrumento ó bien formar el propio regulador del punto de consigna.

El primer caso, que es común en los instrumentos neumáticos de campo, puede verse en la fig. III.20. El segundo caso que es común en los instrumentos neumáticos de panel puede verse en la fig. III.21. Hay que señalar que, en este tipo de instrumentos, la comparación entre la variable y el punto de consigna se hace neumáticamente al transmitirse la variable de esta forma, y al generarse el punto de consigna mediante un convertidor neumático, cuyo botón de accionamiento está situado generalmente en la parte frontal del instrumento.

En las figuras III.20 y III.21, puede verse que el cambio de automático a manual ó viceversa, puede hacerse "sin saltos" en la posición de la válvula siempre que se efectúen con cuidado los pasos descritos. Ello no deja de ser engorroso y para evitarlo, los fabricantes de instrumentos han ideado diversos dispositivos que permiten realizar el cambio 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 fig. III.22 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, el 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 aplica 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<sub>1</sub>, de la unidad de equilibrio.

1

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<sub>2</sub> de la unidad de equilibrio. De este modo, el sistema se

2

equilibra continuamente manteniendo la igualdad  $P_1 = P_3$  y en cualquier

1 3

momento puede pasarse directamente a automático.

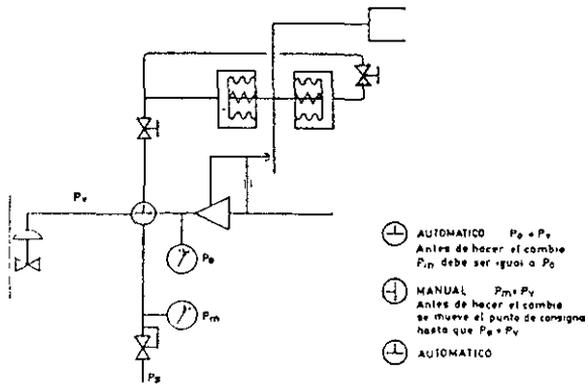


Fig. III.20.- Cambio Automático-Manual-Automático con un Regulador Separado.

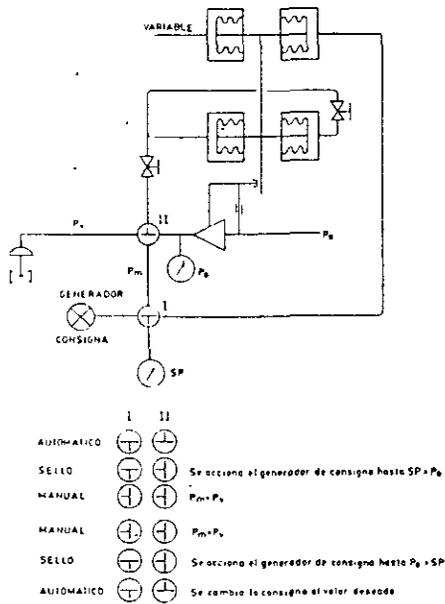


Fig. III.21.- Cambio Automático-Manual-Automático con el Regulador del Punto de Consigna.

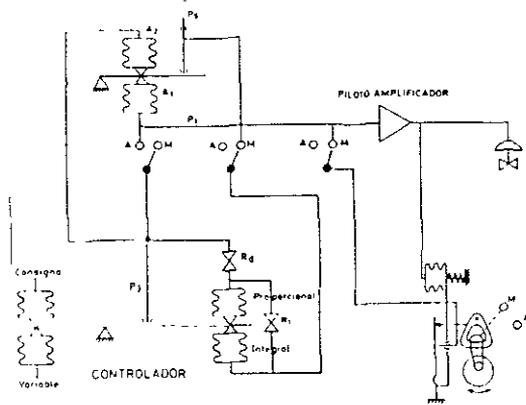


Fig. III.22.- Cambio Directo Automático-Manual-Automático.

### III. 4.- Sistemas de Control Electrónicos.

#### III. 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, con una ganancia de voltaje en lazo abierto normalmente superior a 50 000; que, mediante la conexión de componentes adecuados dispuestos en forma de Realimentación Positiva ó Negativa; constituye el "corazón" de los controladores electrónicos. Necesita sólo una corriente de entrada del orden de 0.5 nA, para dar lugar a un cambio total en la señal de salida (un valor próximo a la corriente de alimentación). Las características más importantes del Amplificador Operacional (OPAM), pueden resumirse en:

3 6

1.- Ganancia de tensión en c-c elevada entre 10 a 10 relación entre una variación en la tensión de salida y la variación correspondiente en la entrada diferencial de tensión.

2.- Corriente de deriva en la entrada de 1 nA a 100 microAmpéres, 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.

3.- Impedancia de entrada elevada, de 10 kΩms a 1000 MΩms.

4.- Bajo consumo, la corriente de alimentación varía entre 0.05 a 25 mA.

5.- Tensión de entrada en defase 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.

6.- Corriente de entrada en defase entre 1 nA a 10 microA diferencia entre las dos corrientes de entrada.

7.- Tensión máxima de salida de 1 a 5 V, menor que los límites de la tensión de alimentación.

8.- Corriente de salida de 1-30 mA.

La mayor parte de los Amplificadores Operacionales (OPAM) son amplificadores diferenciales que, en esencia disponen de tres terminales, dos en la entrada y uno en la salida. Una señal de 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 entrada hará que la

señal de salida cambie en dirección inversa. Este segundo terminal se denomina "*inversor*" y se representa por el símbolo  $-V_e$ .

El símbolo utilizado para representar un Amplificador Operacional es un triángulo equilátero con su base vertical en la que se conectan los dos terminales de entrada, el superior es el inversor  $-V_e$  y el inferior el no

inversor  $+V_e$ , mientras que el vértice se acostumbra situar a la derecha

conectándosele el terminal de salida.

Evidentemente, el circuito real de amplificador es más complejo y está rodeado por muchas conexiones que aunque sean necesarias, no intervienen en la función principal del amplificador. En la fig. III.22 puede verse un esquema de estas conexiones así como el símbolo empleado en los circuitos electrónicos.

Se observan 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.

Posteriormente 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.

### III. 4.2.- Control Todo-Nada.

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 fig. III.24 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 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 establezcan, la señal de entrada debe bajar los suficientes milivoltios, con relación al terminal inversor, para compensar el efecto del divisor de tensión  $R_1$   $R_2$ . El valor de la zona muerta

depende de la relación  $R_1/R_2$  y ser tanto más pequeña cuanto mayor sea esta relación.

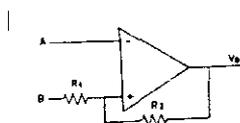


Fig. III.24.- Control Todo-Nada Electrónico.

### III.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 fig. III.25 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:

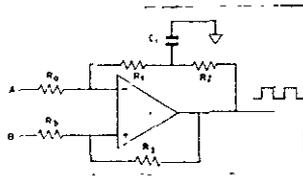


Fig. III.25.- Control Proporcional de Tiempo Variable.

Sea la tensión en A nula y la tensión B negativa con respecto a A. Evidentemente, la señal de salida será negativa, con lo cual el condensador C se cargará negativamente y el divisor de tensión  $R_1$  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 A, la señal de salida se hará positiva, cargando también positivamente el condensador C en un tiempo que depende de los valores  $R_2$  y  $C_1$ . En el instante en que la carga

positiva de C es suficiente para compensar el divisor de tensión formado por  $R_1$ , 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  $R_1$ ,

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. Las variaciones de la tensión de entrada B cambiarán la tensión real media de carga del condensador C lo que fijará la

proporción entre el tiempo de conexión y el de desconexión del relé de salida.

Es decir, si esta tensión media es de 0V, los tiempos serán iguales y la relación valdrá 1 / 1. El sistema utilizará diferentes partes de la curva de carga/descarga del condensador variando la señal de entrada B. Por lo tanto, la proporción entre el tiempo de conexión/desconexión del relé de salida vendrá fijado por el punto de trabajo del condensador C .

1

#### III.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, 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 fig. III.26

puede verse el nuevo esquema de conexionado.

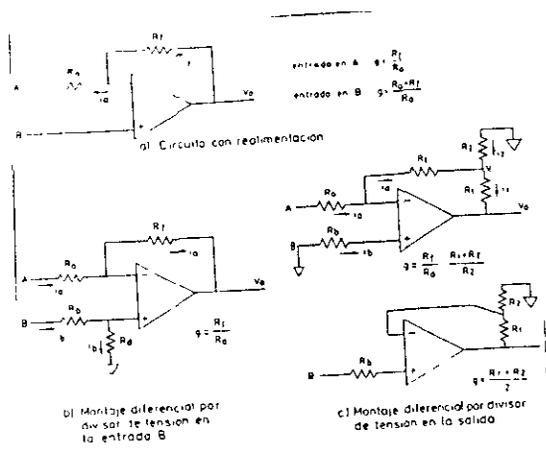


Fig. III.26.- Controlador Proporcional Electrónico.

### III.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 resistencia conectada en serie con el terminal inversor, según puede verse en la fig. III.27. Siendo  $i_b$  una intensidad débil comparada

con la intensidad de corriente  $i_a$  se verificarán las ecuaciones siguientes:

$$V = - \int_0^t i_b(t) dt / C$$

$$PV - SP = i_a R$$

$$V = - 1 / R C \int_0^t (PV - SP) dt$$

que es la ecuación de la acción integral con constante de tiempo  $t = R C$ .

El sistema de la fig. III.27a 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 en el condensador de integral entre la salida y la entrada inversora y conectando esta última a la línea de 0V<sub>+</sub> a través de una resistencia (fig. III.27b).

Cuando se aplica una señal de error PV-SP a la entrada no inversora B, la salida cambia en una dirección positiva, con lo cual, el condensador C se va cargando, pasando así una corriente  $i$  a través de la resistencia R 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  $i$  en la resistencia R 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 y R así como del valor de la señal de error. La señal de error vista el Amplificador Operacional, puede variarse conectando la resistencia R al

cursor de un potenciómetro conectado entre la entrada B de la señal de error y la línea de 0V. De este modo, se obtendrá un ajuste del tiempo de acción integral en el potenciómetro, y un ajuste más amplio cambiando los valores de la resistencia R. En la fig. III.27c, puede verse el esquema correspondiente.

i

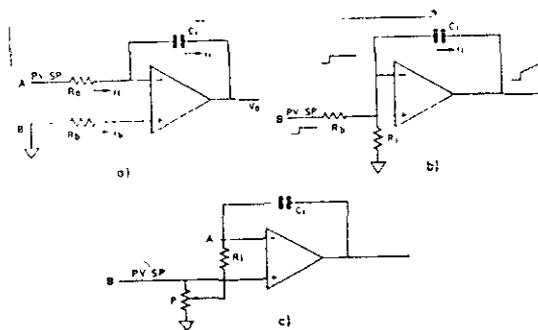


Fig. III.27.- Control Integral Electrónico.

### III.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 fig. III.28a puede verse el esquema básico correspondiente

Las ecuaciones correspondientes son:

$$V_0 = -i_d R_d$$

$$PV-SP = \int i_d(t) dt / C_d$$

derivando la segunda ecuación resulta:

$$d(PV - SP) / dt = 1 / C_d (i_d)$$

y sustituyendo en la primera se tiene

$$V_0 = -R_d C_d [d(PV - SP) / dt]$$

que es la ecuación de la acción derivativa de constante de tiempo  $t_d = R_d C_d$ .

El ajuste de la acción derivativa se obtiene transformando la resistencia  $R_d$  en un potenciómetro.

Quando la señal de error cambia rápidamente (debido a una variación rápida del punto de consigna ó bien de la variable, ó 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 de el 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  $R_d$  (fig. III.28b )

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 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.

### III.4.7.- Control Proporcional-Integral-Derivativo.

La unión en un circuito de los tres controladores descritos anteriormente, dá lugar a un Instrumento Eléctrico Proporcional+Integral+Derivativo. El circuito simplificado consiste en un Módulo Proporcional+Integral (donde se fija la ganancia ó 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 ó la inversa del controlador), y un módulo de acción derivada modificada donde se encuentra el potenciómetro de acción derivada. En la fig. III.29, puede verse un esquema simplificado del controlador. La ecuación correspondiente es:

$$V = g(PV-SP) + K' \int_0^t (PV - SP) dt + K'' [ d(PV-SP) / dt ]$$

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 están en la fig. III.29b.

### III.4.8.- Cambio Automático-Manual-Automático.

En los Instrumentos Electrónicos, el cambio manual-automático ó viceversa, se efectúa sin saltos en la posición de la válvula de control, gracias a un circuito "de memoria", que mantienen 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 (fig. III.29b).

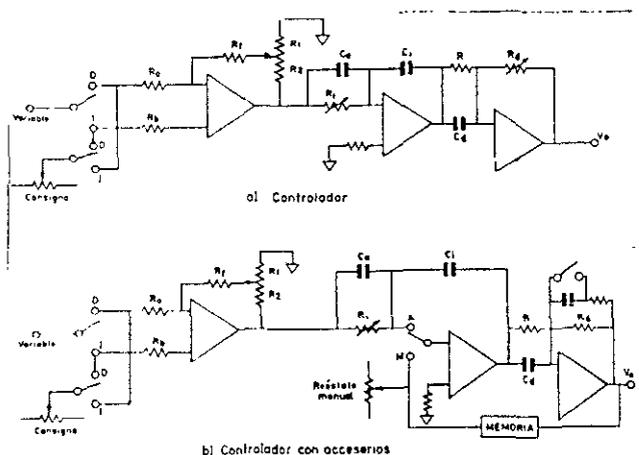


Fig. III.29.- Esquema Simplificado del Controlador PID.

### *III. 5 - Control Por Computadora.*

#### *III. 5.1.- Generalidades.*

Hoy en día con el aumento del tamaño de el Proceso y el crecimiento de su complejidad, llega a ser necesario obtener su óptimo control para conseguir una marcha más perfecta de la Planta y lograr los beneficios adicionales que ello comporta. Si bién existen dos tipos de Ordenadores; el Analógico y el Digital, es más ventajoso emplear el segundo para los Procesos Industriales, debido a las ventajas que presenta al tratar exclusivamente con números puros y será ideal para la solución de problemas numéricos. Así mismo, la alta velocidad conseguida en las señales de mando de las válvulas permite controlar en forma prácticamente continua.

El Ordenador Digital presenta las siguientes ventajas:

- a).- Mayor rendimiento de el Proceso y por lo tanto una gran Producción con menores cortes gracias a la utilización eficiente del material y del equipo.
- b).- Mayor Calidad en los Productos fabricados.
- c).- Mayor seguridad, ya que la acción de corrección y la activación de alarmas es inmediata.

La Optimización idónea se consigue desarrollando un Modelo que refleje exactamente el Sistema de Balance de Energía y de Materiales. Esto puede verse en forma sencilla en el intercambiador de calor de la fig III.30. La ecuación que representa el balance de energía es:

$$Q = F \cdot c \cdot (t_2 - t_1)$$

en la que:

$Q$  = Caudal de Valor.

$q$  = Calor de Condensación del Vapor a la Presión de Alimentación.

$F$  = Caudal de Líquido

$c$  = Calor Específico del Líquido.

e

$t_1$  = Temperatura del Líquido en la Entrada.

1

$t_2$  = Temperatura del Líquido a la Salida.

2

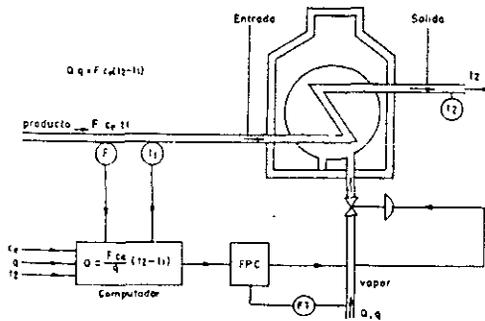


Fig. III.30.- Control de un Intercambiador de Calor.

Se supone que no hay pérdidas ó que éstas son despreciables.

Esta ecuación es el Modelo Matemático simple de el Proceso expresado en forma estática sin tener en cuenta las condiciones dinámicas (en cuyo caso estaría expresada en forma de ecuación diferencial). Como interesa controlar la temperatura de salida, ésta es:

$$t_2 = t_1 + Qq / Fc_e$$

En el control clásico por Realimentación de  $t_2$ , se actúa únicamente

sobre el caudal de vapor  $Q$ , mientras que en el control en adelanto simple se considera sólo el caudal del producto  $F$ . De aquí la importancia de tener en cuenta las demás variables que intervienen en la ecuación para conseguir el Control Total de el Proceso. Por otro lado, la ecuación puede pasarse a:

$$Q = F ( c / q ) ( t_2 - t_1 )$$

expresión que indica que el problema de el Control Total queda resuelto con un instrumento que resuelva la ecuación anterior midiendo las variables  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $F$  e

introduciendo ó tambien los valores de  $c$  y  $q$ . Este intrumento recibe el

nombre de Ordenador. En el ejemplo, su eficacia dependerá de la precisión con que el Modelo Matemático ó Algoritmo de Control se ajuste al modelo real de el Proceso, por lo que se aconseja añadir al sistema un control de realimentación clásico, que naturalmente puede estar también incluido en el Ordenador.

El ejemplo expuesto es muy simple. Como es lógico, al tender los Sistemas a evolucionar hacia una complejidad cada vez mayor, fue inevitable el intentar desarrollar un Ordenador de gran capacidad que realizara la función de controlar todas las variables de el Proceso en un forma óptima. Este Ordenador Programable y para usos generales evolucionó en dos etapas: El Control Digital Directo y el Control Supervisor.

Estos Ordenadores iniciaron la separación de la Instrumentación Analógica del mando directo del operador, pasando éste gradualmente a funciones de supervisión ó interviniendo sólo en caso necesario al ser avisado por el Ordenador.

La decisión de instalación de un Ordenador conectado a el Proceso debe realizarse de acuerdo con múltiples factores de los cuales se exponen los siguientes:

a).- La Planta debe tener una Producción anual muy grande para que sea factible obtener un pequeño porcentaje de mejora en su rendimiento que pueda satisfacer la inversión grande que representa la intalación de control por Ordenadores.

b).- Que la Producción de la Planta sea menor del 90 % de la máxima teórica.

c).- Que haya varias líneas de el Proceso muy importantes.

d).- Que el Proceso cambie sus características internas con el tiempo, tal como en el caso de los coeficientes de transferencia del calor en un horno, en un intercambiador de calor, etcétera; donde se preve, que la instalación de instrumentos convencionales dará menor rendimiento.

e).- En procesos en desarrollo puede ser muy útil la instalación de un Ordenador, puesto que permite realizar estudios de manera continua que facilitan su mejor diseño.

### III.5.2.- Control DDC.

En el Control Digital Directo que apareció hacia los años 60, el Ordenador lleva a cabo todos los cálculos que realizaba individualmente los controladores P, P+I, P+I+D generando directamente las señales que van a las válvulas. Este tipo de control se denomina "*Control Digital Directo*" ó DDC , y realiza las siguientes funciones:

- a).- Explora las variables de Entrada Analógicas ó Digitales.
- b).- Las compara con los puntos de consigna e introduce la señal de error en el algoritmo de control correspondiente.
- c).- Envía las señales de salida a las válvulas de Control de Proceso.
- d).- Se disponen Instrumentos Analógicos en paralelo con el Ordenador en los puntos críticos y actúan como reserva en caso de falla.

En el Control DDC, el Ordenador está enlazado con el Proceso en las partes que pueden verse en la fig. III.31. Las señales procedentes de los transmisores de campo se reúnen en un terminal y pasan a una unidad de filtrado y acondicionamiento donde son convertidas a señales digitales, para ser usadas en los cálculos posteriores del control. Estas señales de entrada pueden tener varios orígenes:

#### 1.- Señales de tensión procedentes de:

- a).- Termopares.- Que se caracterizan por una FEM pequeña que les hace sensibles al ruido eléctrico, no mantienen una linealidad entre la FEM y la temperatura, y necesitan una compensación de la unión fría.

b).- Reóstatos.

c).- Tacómetros.

d).- pH y Conductividad.

2.- Señales de corriente procedentes de transmisores.

3.- Variaciones de resistencia de sondas que se caracterizan por una relación no lineal con relación a la temperatura. A continuación, se conectan a un multiplexor donde, de forma aleatoria ó secuencial, pasan al Ordenador. El Ordenador permite comprobar cada señal de entrada y compararla entre límites prefijados para detectar si sale fuera de estas magnitudes y determinar así, a través de la lógica del Ordenador, las causas de la desviación iniciando una alarma ó bien imprimiendo intrucciones para la operación de la Planta.

Por otro lado, el Sistema DDC compara la señal enviada a la válvula de control con la de entrada y determina la aceptabilidad de la información para la acción de control. Si ésta no es aceptable se retiene la última posición de la válvula y el operador es prevenido, tomando el Ordenador una acción de emergencia. De este modo, los límites de operación de el Proceso pueden estrecharse con seguridad de manera que éste puede llevarse a un punto de operación crítico sin problemas.

El DDC permite una transferencia automático-manual sin perturbaciones y admite una fácil modificación de las acciones y de las configuraciones de los Sistemas de Control, lo cual es muy importante en la puesta en marcha de la Planta. El DDC tiene la ventaja sobre los controladores convensionales de estar previsto de un calibrado automático que corresponde a las condiciones de operación instantáneas, es decir, el Ordenador ajusta la calibración de sus Algoritmos de acuerdo con una función predeterminada de la variable medida ó de una combinación de variables en lugar de requerir periódicamente la calibración individual de cada instrumento, por un instrumentista ó especialista en instrumentos, tal como ocurre con los instrumentos convensionales.

El Ordenador propiamente dicho admite la información de entrada del sistema proveniente de un programa específico ú otros tipos de soporte y almacena estos datos en una "memoria", conectada a una "unidad central de tratamiento" compuesta por una "unidad aritmética" y una sección de "control", de esta última salen y entran los datos de el Proceso a través de la interfase. La unidad de memoria almacena las instrucciones de programa y los datos empleados por la unidad central de tratamiento.

Entre los diversos tipos de memoria empleados en los Ordenadores de Proceso se encuentra la memoria de núcleo magnético y los semiconductores como los más importantes, apoyada por memoria RAM en semiconductores. La memoria de núcleo magnético consiste en un núcleo ferromagnético que puede magnetizarse en uno ú otro sentido; la magnetización en una dirección mediante un hilo xx se interpreta como "1" y en la dirección opuesta realizada mediante otro hilo yy se toma "0". La lectura de una "palabra" se efectúa excitando todos los núcleos correspondientes, de tal modo que vuelven al estado magnético "0", y vigilando los hilos "sensores" para captar un cambio en el flujo magnético.

Los núcleos se agrupan en planos conteniendo cada uno la misma posición de bit, y los planos se disponen en bloques uno encima de otro. Los núcleos son de pequeñas dimensiones usualmente, de 0.5 - 1 mm de diámetro, y se magnetizan en un tiempo corto de unas pocas millonésimas de segundo. La memoria de tambor, consiste en un tambor recubierto con una fina capa de material magnético que gira a gran velocidad y que en su superficie dispone de cabezas magnéticas de lectura/escritura. Estas utilizan técnicas de registro magnético para escribir bits en la superficie del tambor y leerlos cuando interesa.

La memoria de disco magnético es semejante a la de tambor y contiene una hilera de discos recubiertos con material magnético dispuestos en el mismo eje. Las cabezas de lectura/escritura se desplazan hacia afuera y hacia adentro entre las pistas del disco son de costo bajo y disponen de una gran capacidad.

El tiempo de acceso en las memorias de tambor y de disco magnético es relativamente largo, ya que es necesario que el tambor ó el disco gire para que las cabezas se sitúen en el punto exacto de localización, y aunque la velocidad de giro sea elevada, del orden varios miles de revoluciones por minuto, el tiempo de acceso es significativo. Por este motivo, se utilizan generalmente, como memorias auxiliares.

La unidad central de proceso, es el verdadero centro "*nervioso*" del Ordenador al realizar por un lado las operaciones Aritméticas y Lógicas (ALU), y por otro lado controlar el flujo de datos (Unidad de Control). La presentación de la información accesible al operador desde el Ordenador puede adoptar varias formas:

- a). Teleimpresores y máquinas de escribir.
- b). Lector de cinta.
- c). Perforador de cinta.

d). Pantalla de televisión que muestra a voluntad de el Operador el estado operacional de la planta ó de una sección de la misma, ó bién de un lazo de control.

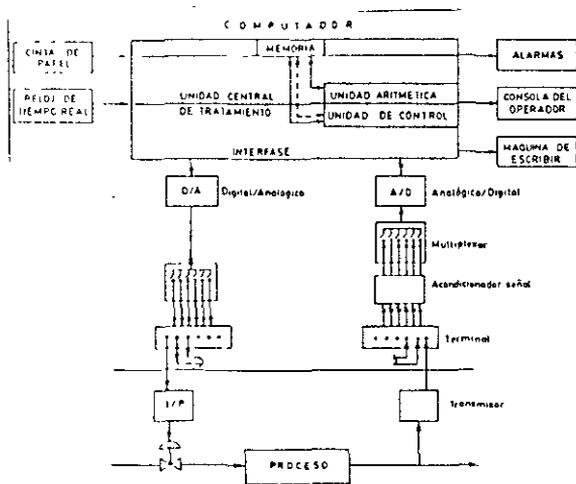


Fig. III.31.- Componentes de el Sistema DDC

Entre las ventajas de el Sistema DDC figuran:

a). Flexibilidad en el diseño de el Sistema de Control, pudiéndose pasar fácilmente de una acción de control a otra, diseñar la ecuación de control que más convenga a el Proceso, y añadir cómodamente acciones de control en adelanto ó en cascada.

b). Rendimiento del control al trabajar muy próximamente al punto óptimo de operación.

c). Seguridad al poder comprobar cada variable entre unos límites prefijados.

### III. 5.3.- Control Supervisor.

A pesar de estas ventajas, el gran problema que presenta el DDC es, como todo Sistema Electrónico, los posibles fallos de sus componentes a pesar de los avances constantes en la tecnología de los circuitos integrados y la simplificación creciente lograda en el diseño de los Ordenadores.

Una protección parcial se consigue utilizando estaciones de transferencia automático-manual colocadas fuera del Ordenador y disponiendo controladores analógicos adicionales en los lazos críticos. Sin embargo, para garantizar la ausencia total de fallos habría que utilizar más de un Ordenador interconectados entre sí para que pudieran sustituirse mutuamente en su función.

Para alcanzar la máxima seguridad de funcionamiento y lograr la Optimización idónea de el Proceso, el Ordenador podría determinar los puntos de consigna más convenientes en cada instante, aplicarlos a los lazos de control situados dentro del propio Ordenador ó bien en el exterior de controladores individuales. Este tipo de control recibe el nombre de "*control de puntos de consigna*" ó SPC (Set Point Control), ó bien Control Supervisor. En la fig. III.32 puede verse un esquema de un Control Supervisor. Se observa que en el paralelo con el bucle de control entre el transmisor y el controlador analógico, el Ordenador calcula los puntos de consigna y los envía secuencialmente a cada instrumento. Si se presenta cualquier avería, el controlador regula la variable de el Proceso en el último punto de consigna que recibió del Ordenador.

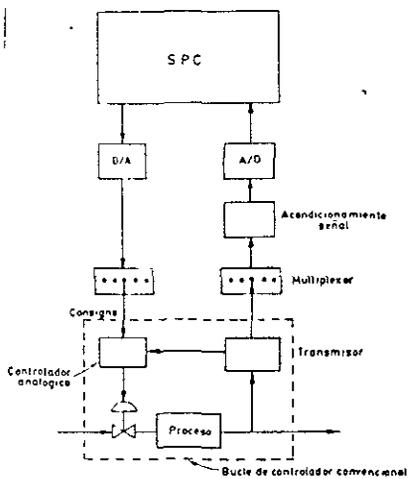


Fig. III.32.- Control Supervisor.

### III. 5. 4.- Otros Tipos de Control.

Los Ordenadores Digitales pueden actuar sin estar conectados directamente a el Proceso (off-line). Reciben su información de entrada a través de un Operador (humano) y realizan unos cálculos programados cuyos resultados figuran en una cinta de papel, ó una ficha perforada, ó una cinta magnética, discos ó tambores. Se aplican en la Industria, como elementos auxiliares de gestión, así como de inventarios y almacenamiento de "stocks".

Son útiles también en el estudio económico de las operaciones de los diferentes elementos de la Planta, en los cálculos de Ingeniería del Proyecto, y en el progreso de la instalación y puesta en marcha de Complejos Químicos importantes. El Ordenador puede trabajar también como "sistema de adquisición de datos" (DAS), conectado a la Planta con capacidad para linealizar, filtrar, enclavar y dar alarmas de los datos recibidos. El Operador dispone de una consola con pantalla de televisión para interrogar y recibir los datos convenientes del Ordenador y de un Monitor de alarma que compara las entradas normalizadas con límites prefijados que el Operador puede generalmente cambiar teniendo facilidades de programación en la configuración del Ordenador.

Otra misión del Ordenador es el "control secuencial" [DPS (direct plant sequency)] empleado en procesos discontinuos ó en operaciones secuenciales de el Proceso. El sistema controla fundamentalmente variables Todo-Nada a fin de lograr una programación secuencial. Las señales de entrada de el Proceso proceden de entradas digitales, de controladores discontinuos, de estados secuenciales, ó de entradas introducidas por el propio Operador. El Ordenador DPS puede estar en comunicación con los Ordenadores DDC, DAS y SPC captando así puntos de referencia en bucles de control, variación de los puntos de consigna en el Ordenador supervisor y datos analógicos en los registros de adquisición de datos.

### III. 6.- Evolución de la Instrumentación.

Los instrumentos de control fueron naciendo a medida que las exigencias de proceso lo impusieron. Las necesidades de la industria fueron (y son actualmente) el motor que puso en marcha la inventiva de los fabricantes ó de los propios usuarios para idear y llevar acabo la fabricación de los instrumentos convenientes para los Procesos Industriales. El desarrollo se inició con los manómetros, termómetros y válvulas manuales localmente montados. En esta fase eran necesarios muchos Operadores para observar los instrumentos y maniobrar las válvulas (fig. III.33). Los Procesos y los Instrumentos eran proyectados empíricamente basándose en la intuición y en la experiencia acumulada y no estaban centralizados para conseguir una mayor eficiencia en las funciones de el Operador.

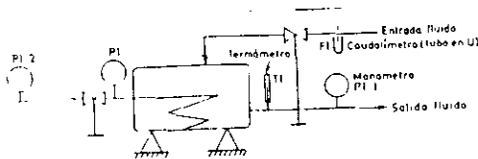


Fig. III.33.- Instrumentos Locales.

La siguiente etapa fue la centralización de las funciones de medida y de control más importantes, pertenecientes a una operación de el Proceso, en un panel localmente montado. De este modo podía observarse y controlarse el funcionamiento de cada elemento particular de la instalación de una manera más coordinada y eficaz. Para hacer esto posible, se desarrollaron instrumentos galvanométricos operados por termopar, termómetro con largos capilares y caudalímetros con largos tubos de conducción de la presión diferencial (fig. III.34).

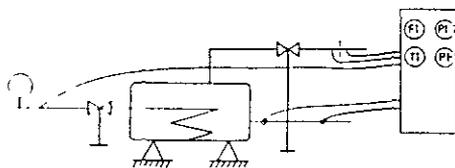


Fig. III.34.- Centralización en Panel.

Sin embargo, los procesos se hicieron más complejos y críticos y llegó a hacerse necesario que los Operadores observaran el funcionamiento de varias unidades de la instalación simultáneamente. El desarrollo de los transmisores neumáticos permitió la centralización de las funciones de medida y de regulación de toda una Unidad de Proceso en una sala de control, utilizándose como receptores los instrumentos registradores controladores neumáticos de caja grande que aparecieron hacia el año de 1940. Estos instrumentos se perfeccionaron con un diseño modular hacia el año de 1946, conservando al unidad automático-manual de cuatro posiciones en un subpanel aparte.

A medida que paso el tiempo, estas salas de control se hicieron indebidamente grandes, debido al crecimiento de los procesos y al tamaño de los instrumentos convencionales y se desarrolló la instrumentación neumática miniatura que apareció en el Mercado hacia el año 1947, dotada ya con conmutación automático-manual incorporada, pero con el mismo tipo de transferencia.

A principios de los años 50 aparecen los primeros instrumentos electrónicos a válvulas. Más tarde se perfecciona la unidad automático-manual neumática, consiguiéndose el cambio en un sólo paso, sin que se produzcan saltos en la señal de salida a la válvula y aparecen paralelamente los Instrumentos Electrónicos miniatura alrededor de los años 1960. El tamaño de estos Instrumentos Neumáticos y Electrónicos es ya reducido, pero todavía experimentará una normalización posterior.

Los complejos de múltiples procesos empezaron a utilizar salas de control separadas y la coordinación y la comunicación entre los Operadores en estas salas de control comenzaron a plantear algunos problemas. Además se introdujeron equipos centrales de tratamiento de datos que requerían la disponibilidad de diversas señales de medida en un punto central. Los paneles de alta densidad permitieron básicamente que un Operador supervise un gran complejo compuesto por muchos procesos. Los sistemas de instrumentación de alta densidad (fig. III.35), normalizaron sus dimensiones a (150X75 mm) en indicadores controladores y (150X150 mm) en registradores, y tuvieron que satisfacer los siguientes requisitos:

- a).- Permitir que el Operador asimile rápidamente la información.
- b). Permitir que el Operador tome sus decisiones muy rápidamente.
- c). Permitir una rápida ejecución de las decisiones de el Operador.

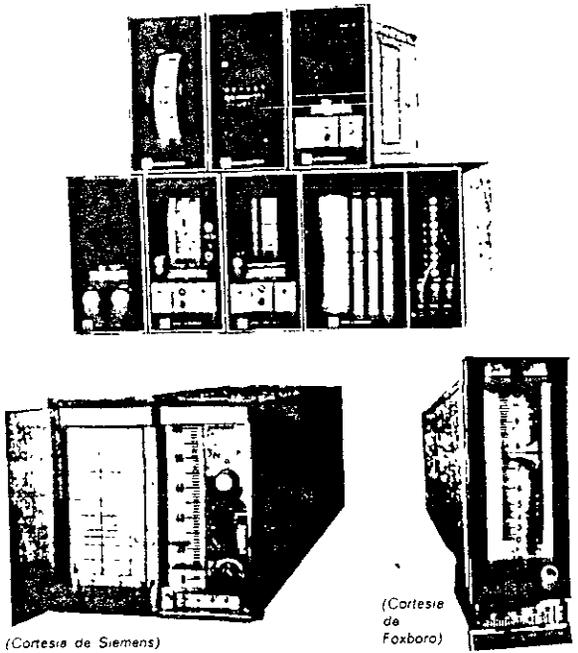
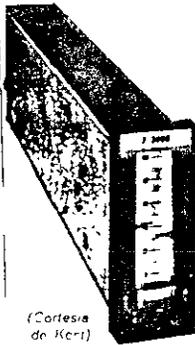
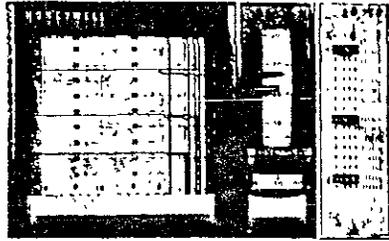


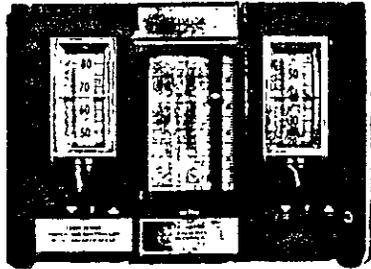
Fig. III.35.- Instrumentación de Alta Densidad.



(Cortesía de Klett)



(Cortesía de Honeywell)



(Cortesía de Taylor)

Fig. III.35.- Instrumentación de Alta Densidad (Continuación).

La primera característica la proporcionó el indicador de desviación, que facilita tres elementos de información:

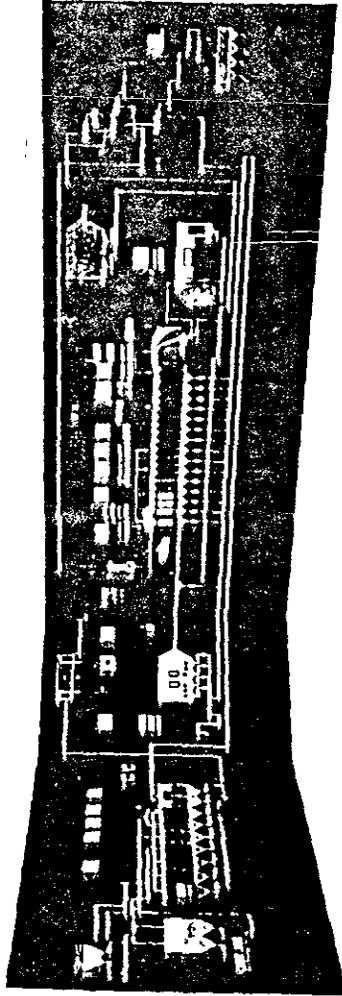
- a).- La existencia de una desviación.
- b).- Si la desviación es positiva ó nagativa.
- c).- Cuál es la magnitud de la desviación.

La desviación se pone de manifiesto con dos índices de distintos colores, el de la variable de color rojo ó naranja y el del punto de consigna de color verde. Cuando no hay desviación, el índice de color rojo ó naranja no es visible en absoluto, y todo lo que se ve es una línea verde que se extiende a través de la fila de los controladores de indicación. Cualquier desviación que se presente en cualquier instrumento, ser fácilmente visible al destacar el índice rojo ó naranja de la línea verde que mantienen los restantes instrumentos.

Otro complemento de la información lo constituye las lámparas señalizadoras incorporadas en los anunciadores de alarmas. Estos toman muchas formas, desde la más sencilla con un final de carrera conectado a una luz indicadora en el panel, pasando por la forma normal con ventanillas iluminadas que ante una condición de alarma generada por un presóstato, termostato, etcétera; centellea y hace sonar una bocina, hasta las formas más complejas que memorizan la secuencia de acontecimientos que conduce al paro parcial ó total de la Planta.

Habiendo adquirido rápidamente información sobre cualesquiera condiciones anormales, el Operador tiene que decidir lo que piensa hacer. Necesita refrescar su memoria sobre el Organigrama que cubre el Proceso ó los varios procesos que tiene asignados. La presentación inicial de información que se ideó fueron los "*páneles gráficos*" (fig. III.36) en los que los instrumentos, los pulsadores y los pilótos de bombas y las alarmas estaban dispuestos en el panel, siguiendo el trazado de el Proceso y colocados en su posición real.

El problema que presentaba esta disposición era el excesivo espacio de panel ocupado y la imposibilidad de cambiar los instrumentos de lugar ante eventuales modificaciones de el Proceso. Se solucionaron parcialmente estos problemas con los paneles semigráficos (fig. III.37), donde los instrumentos se montan empotrados en filas de dos ó cuatro a una altura conveniente para su manejo por parte de el Operador.



(Correia de Junyent y Boñil)

Fig. III.36.- Panel Gráfico.

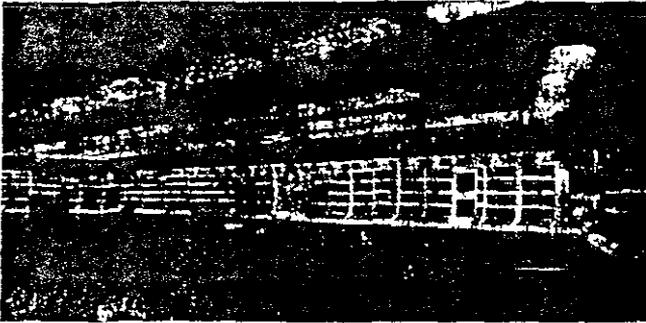
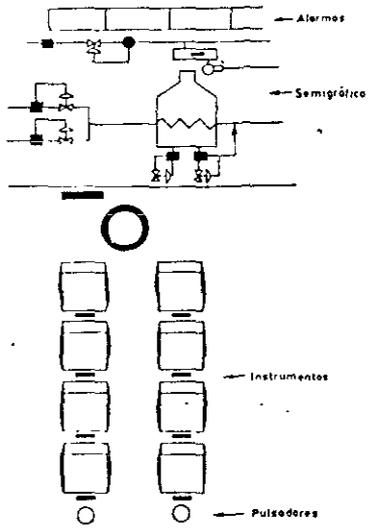


Fig. III.37.- Panel Semigráfico.

Los pulsadores y pilótos de bombas se encuentran en una fila más baja, las alarmas van montadas en la parte superior y sobre ellas ó a un nivel inferior se encuentra un semigráfico, es decir, un Diagrama de el Proceso con los instrumentos representados y codificados. De este modo, se aprovecha más el espacio del panel, pero subsiste el inconveniente del semigráfico. Este, si bién resulta útil en la puesta en marcha, más tarde se convierte en un elemento puramente decorativo, que debe codificarse si cambia el Proceso.

Por otro lado, la signación al Operador de uno ó varios procesos complejos da lugar a un panel de dimensiones bastante considerables, lo que pone un límite a la capacidad de asimilación de el Operador y al mismo tiempo restringe la legibilidad de los detalles de el Proceso dibujados en el semigráfico. Dentro de la corriente de simplificación se utilizan registradores de tres plumas conmutables para 15-20 señales y montados debajo de los indicadores controladores, de modo que sea fácil distinguir rápidamente los puntos que se están registrando. Para tener una mayor flexibilidad a la puesta en marcha pueden conectarse registradores portátiles montados sobre un mueble tipo carro.

Para tener todavía información más detallada se presenta la información en la pantalla mediante un proyector de diapositivas. Oprimiendo dos ó tres botones, el operador puede exigir la presentación sobre la pantalla de cualquier diapositiva de proyector coloreada seleccionada. Puede haber una selección de 100 ó más diapositivas, dando partes diferentes del Organigrama de el Proceso y toda la información adicional que el Operador pueda necesitar.

El Operador ha recibido ya, de este modo, indicaciones rápidas de cualesquiera condiciones anormales de el Proceso y a la vista de la información clara de el Proceso presentada, ha tomado ya una decisión, y ahora debe ejecutarla, lo cual se hace posible por la disposición física de los elementos que gobiernan el funcionamiento del controlador.

1.- La conmutación de manual a automático ó viceversa es una operación de un sólo paso, que puede ejecutarse en cualquier momento, incluso en presencia de una desviación respecto al punto de consigna, y tanto en instrumentos neumáticos como en los electrónicos.

2.- La conmutación de control de punto de consigna "remoto" es una operación de un sólo paso que puede ejecutarse en cualquier momento, independientemente del estado del bucle de control. La vuelta al funcionamiento en cascada se hace también fácil.

3.- Los ajustes manuales del punto de consigna pueden ejecutarse rápidamente por medio de discos fácilmente accesibles, situados en la parte frontal del Instrumento.

Una vez desarrollados los instrumentos miniatura neumáticos y electrónicos, los procesos se fueron haciendo poco a poco mucho más complejos y su optimización llegó a ser una necesidad. En esta etapa es donde empezaron a utilizarse los Ordenadores. El primer Ordenador electrónico apareció hacia el año 1946, pero los verdaderos Ordenadores de Proceso se desarrollaron realmente en los años 1960-1965, y se aplicaron principalmente en Centrales Térmicas, Industrias Metalúrgicas, Químicas y Petroquímicas. Permitieron optimizar y controlar las operaciones de la Planta obteniendo productos de calidad alta y constante con ahorros importantes en el Proceso, a pesar de su costo elevado.

Desarrollados los Ordenadores y vistas las características de los instrumentos miniatura analógicos en paneles de alta densidad, la evolución continúa de los procesos y la complejidad creciente que los mismos iban adquiriendo hizo que los fabricantes, en colaboración con los usuarios de instrumentos, fueran buscando otras soluciones para que sin utilizar ningún Ordenador ó en todo caso emplearlo como auxiliar, el Operador no se viera desbordado por la necesidad de captar rápidamente una gran cantidad de información que le era necesaria para llevar a cabo un buen control. Evidentemente, le es difícil "dominar" un Proceso complejo con una gran cantidad de instrumentos dispuestos en un panel de excesiva longitud.

La primera tendencia que apareció en el Mercado fue separar las partes los instrumentos que realizaban las funciones auxiliares y de control analógico de las de indicación, registro ó variaciones del punto de consigna que el Operador debía efectuar. De este modo, el primer grupo pasó a una habitación aparte y fue dispuesto de forma modular para que fuera lo más accesible y lo más ventajoso posible para el personal de mantenimiento.

El segundo grupo de instrumentos eran puramente aparatos receptores (indicadores y registradores), y otros con posibilidad de envío de señal de punto de consigna (controladores) montados en un panel en la sala de control a la vista de el Operador ó de el Supervisor de Proceso. En la fig. III.38 puede verse un esquema comparativo de los instrumentos miniatura electrónicos integrales y los de funciones separadas. Se señala que los instrumentos miniatura de funciones separadas, se han aplicado con preferencia en calderas y en Centrales Térmicas quizá debido a la naturaleza compleja de sus sistemas de control. La selección de un sistema ó de otro depende de múltiples factores, el más importante es el grado de complejidad de el Proceso que fija los costos relativos de cada sistema, pudiendo afirmarse de modo simple que cuanto más complejo sea el Proceso tanto más se inclinar la selección por el sistema de funciones separadas. Puede afirmarse que este instrumento tiene un mantenimiento más fácil y que su instalación es preferible en consolas ó paneles inclinados por ocupar menos espacio. El instrumento integral es más fácil de ajustar en sus acciones de control y su costo es menor cuando se trata de lazos simples.

Actualmente existe la tendencia de cubrir técnicamente la separación entre los controladores analógicos (integrales ó de funciones separadas), y el Ordenador [sea el Digital Directo (DDC) ó el Supervisor (SPC)]. Existe la necesidad de coordinar los diversos controladores estableciendo una jerarquización entre los mismos y lograr una versatilidad que permita el cambio fácil del tipo de control y obtener la mayor economía posible en el control de la Planta. Estas características las reúne el denominado "*Control Distribuido*" en el que uno ó varios Microprocesadores se encuentran repartidos en varios puntos de la Planta donde están conectados a varias señales de Proceso correspondientes, en general, a una parte homogénea de la Planta.

Estos Microprocesadores se distribuyen de forma arquitectónica y están conectados entre sí a través de una vía de comunicaciones, la cual comunica a su vez con el centro supervisor del control central, desde donde se tiene acceso de modo automático ó manual a todas las variables de Proceso de la Planta. La ventaja fundamentalmente del control distribuido es la mayor seguridad y economía de funcionamiento, al ser los lazos de control de cada Microprocesador de menor longitud (por estar situado en el centro óptimo de las variables de Proceso captadas), y menos vulnerables al ruido ó a los daños; por otro lado, ante la posible (pero poco probable) pérdida de la vía de comunicaciones (que suele ser redundante) los controladores continúan operando localmente.

Además, el Operador tiene acceso a todos los datos de los controladores (puntos de consigna, variables de Proceso, señales de salida a válvulas, etcétera) y puede visualizarlos a través de pantallas de televisión, ya que se halla en contacto con los mismos a través de la vía de comunicaciones. Si se desea puede acoplarse un Ordenador al conjunto del sistema

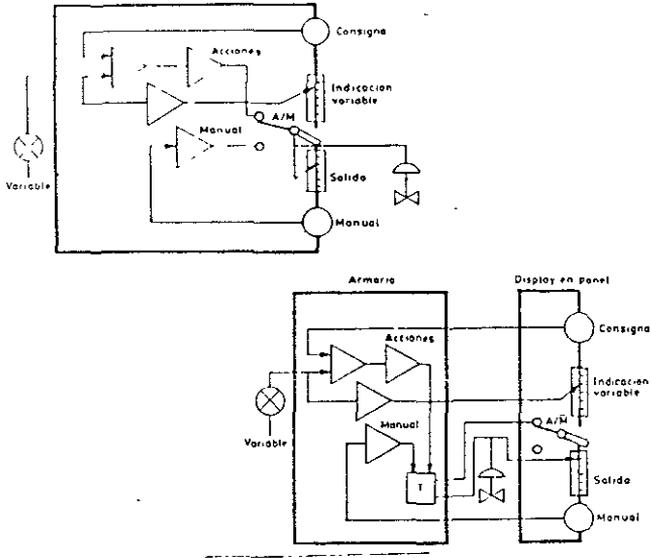


Fig. III.38.- Instrumentos Miniatura Integrales y de Funciones Separadas.

Finalmente, la tendencia que se avecina en un próximo futuro es el uso de Microprocesadores para un sólo bucle en sustitución de los clásicos controladores electrónicos miniatura de papel. Cada Microprocesador contiene una unidad central, un reloj, memorias, módulos de Entrada/Salida, convertidores A/D, temporizadores y una fuente de alimentación, incluyendo físicamente estos elementos en una única tarjeta de circuito impreso. El Microprocesador se comporta como un controlador PID con los algoritmos adecuados, acepta puntos de consigna remotos y transmite la necesaria información de el Proceso. Si falla la corriente de alimentación, el aparato volver a sus condiciones iniciales existentes en el momento del fallo, tan pronto como se restablezca la alimetación. La ventaja principal que ofrecer el Microprocesador ser prncipalmente su bajo costo, que indudablemente bajar a medida que se utilicen en masa, entrando en franca competencia con el controlador básico PID.

## CAPÍTULO IV

### CALIBRACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS

#### *IV.1.- Introducción.*

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 salida del instrumento. Por ejemplo: Presión de el Proceso a 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), 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, etcétera.

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, etcétera.

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 ó 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 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 del transmisor. En la fig. IV.1 pueden verse estas funciones en varios tipos de instrumentos.

Un instrumento ó una de sus partes pueden considerarse como dispositivos de conversión señales (transductores) que pasan de una variable de entrada (presión, caudal, nivel, temperatura, posición, pH, conductividad, posición, etcétera) a una ó varias de las siguientes funciones en la salida: Indicación de la variable de entrada, lectura de un índice ó de una pluma de registro; transmisión de la variable de entrada en señal neumática ó eléctrica; fijación de una posición de una palanca ó de un vástago de una varilla interna del instrumento ó 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 exactamente al de la variable de entrada, el instrumento estar 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 ó 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, ó 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.

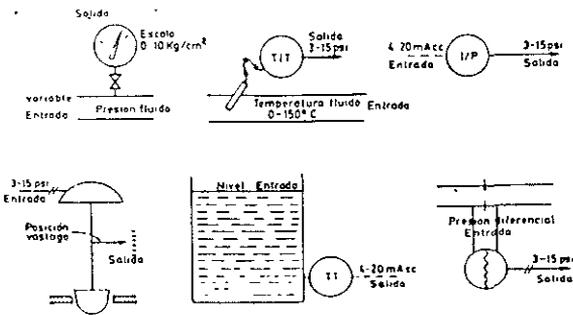


Fig. IV.1.- Relación Salida-Entrada en Varios Tipos de Instrumentos.



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 y 19 lb/pulgada cuadrada respectivamente. Si el instrumento fuera electrónico, las señales de salida serían: 4, 12 y 20 mA, respectivamente. En condiciones de funcionamiento estático, las desviaciones respecto a la relación indicada, dan lugar a los errores de calibración de los instrumentos, suponiendo que estas desviaciones no superan la exactitud dada por el fabricante del instrumento, ya que en este caso se considera al instrumento calibrado, aunque no coincida exactamente la curva variable-lectura con la recta real.

Las desviaciones de la curva variable real-lectura de un instrumento típico, tal como el de la fig. IV.3, 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 ó combinada en los instrumentos.

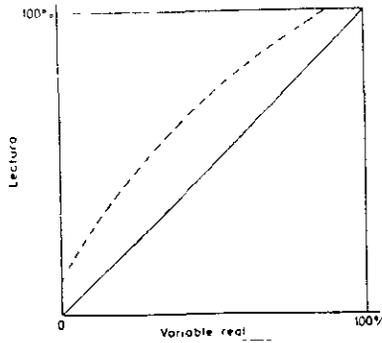


Fig. IV.3.- Relación Medida Real-Lectura en un Instrumento Descalibrado.

Los tipos de errores que se pueden encontrar se muestran a continuación:

1.- 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 fig. IV.4, en la que se observa que el desplazamiento puede ser positivo ó negativo. El punto de partida ó de base de la recta representativa cambia sin que varíe la inclinación ó la forma de la curva.

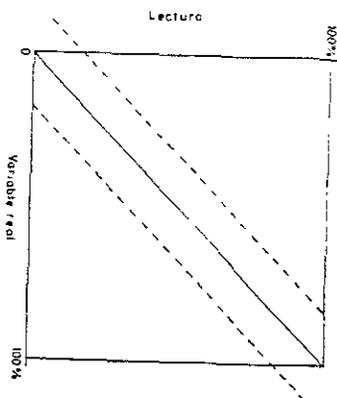


Fig. IV.4.- Error de Cero.

2.- Error de multiplicación.- Todas las lecturas aumentan ó disminuyen progresivamente con relación a la recta representativa, según puede verse en la fig. IV.5, en la que se observará que el punto base no cambia y que la desviación progresiva puede ser positiva ó negativa.

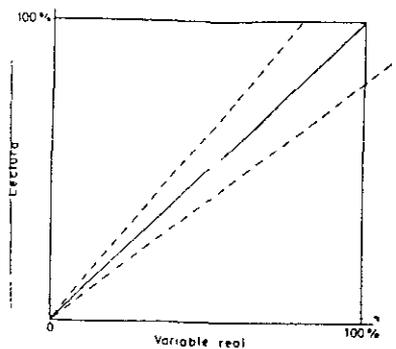


Fig. IV.5.- Error de Multiplicación.

3.- 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 fig. IV.6 puede verse un error de este tipo. El máximo de la desviación suele estar hacia la mitad de la escala.

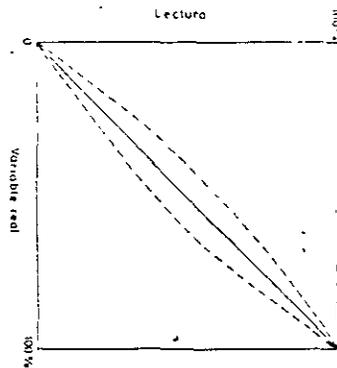


Fig. IV.6.- Error de Angularidad.

Los instrumentos pueden ajustarse para corregir estos errores, si bien hay que señalar que algunos instrumentos, por su tipo de construcción, no pueden tener error de angularidad. La combinación de estos tres errores da lugar a una curva de relación medida real-lectura, tal como la representada en la fig. IV.3. En general, el error de cero se corrige con el llamado tornillo de cero, que modifica directamente la posición del índice ó de la pluma de registro cambiando la curva variable-lectura paralelamente a sí misma, ó 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 (ó “span”), que modifica directamente la relación de amplitud de movimientos de la variable al índice ó a la pluma; es decir, que aumenta ó disminuye progresivamente las lecturas sobre la escala. Para calibrar un instrumento conviene, en primer lugar, eliminar ó reducir al mínimo el error de angularidad. Este error es debido fundamentalmente a la transmisión por palancas del movimiento del elemento primario ó de la variable medida al índice de lectura ó de registro (fig. IV.7). 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 ó de la pluma, y no existe error de angularidad. La operación inicial se situará las palancas perpendiculares entre sí, recibe el nombre de “*encuadrado 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  $VA$ , 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  $N'IN'' = \alpha$ .

Por consiguiente, para corregir el error de angularidad es necesario realizarlo en la dirección contraria a la lógica; es decir, en la misma dirección de error. De lo expuesto se desprende que el error de angularidad puede eliminarse procediendo al encuadrado previo de las palancas para el valor de 50% de la variable, ó bién, actuando sobre el tornillo de angularidad para aumentar el valor del error en la dirección del mismo.

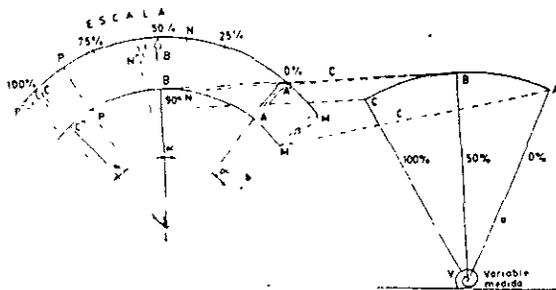


Fig. IV.7.- Corrección de Angularidad.

En la práctica, se suele considerar que este aumento es de unas 5 veces el error encontrado. Hay que hacer notar, que la acción del tornillo de angularidad, consiste en realidad en alargar ó acortar la longitud de la varilla de unión entre el brazo de la variable y el del índice ó 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:

1.- Situar la variable en el valor mínimo del campo de medida, y en este valor, ajustar el tornillo de 0 del instrumento hasta que el índice señale el punto de base (fig. IV.8b).

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. IV.8c).

3.- Repetir los puntos anteriores 1 y 2 sucesivamente, hasta que las lecturas sean correctas en los valores mínimo y máximo (fig. IV.8 d y e).

4.- Colocar la variable en el 50% del intervalo de medida, y en este punto ajustar el tornillo de angularidad hasta volver el índice 5 veces el valor del error en la dirección del mismo (la curva real se aplanan). Es de interés señalar que puede prescindirse de este paso procediendo previamente al encuadrado de las palancas para el 50% de la variable (fig. IV.8f).

5.- Reajustar sucesivamente el tornillo de 0 y el de multiplicación, hasta conseguir la exactitud deseada ó requerida (figs. IV.8 g, h, i). Si fuera necesario, efectuar una nueva corrección de angularidad.

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 lb/pulgada cuadrada) ó electrónicos (4-20 mA) respectivamente.

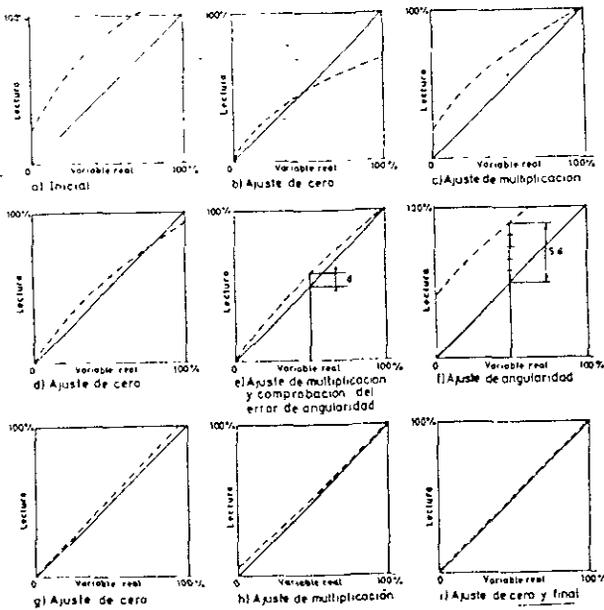


Fig. IV.8.- Método General de Calibración.

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 bimetalícos tienen usualmente tornillo de cero; los manómetros poseen tornillo de cero (ó 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 (fig. IV.9).

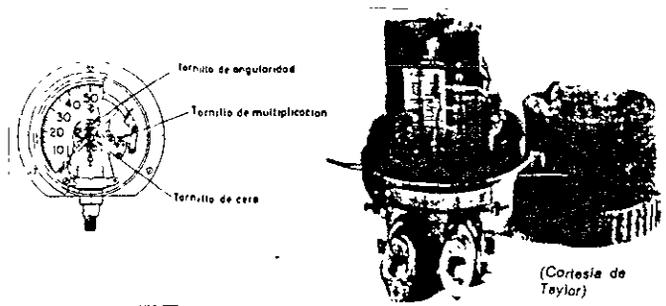


Fig. IV.9.- Tornillos de Ajuste de Cero, Multiplicación y Angularidad.

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:

1.- Error de paralelaje, 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 de especulación, con lo que la línea de observación debe ser perpendicular a la escala para que coincidan el índice y su imagen.

2.- 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 ó por defecto.

Evidentemente, estos errores de paralelaje 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.

### *IV.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. IV.10) 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.

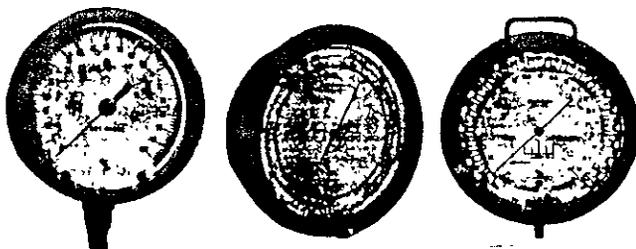


Fig. IV.10.- Manómetros Patrón.

Esta precisión se consigue de varias formas, las cuales son:

1.- Dial con una superficie de especulación, de modo que la lectura se efectúa por coincidencia exacta del índice y de su imagen, eliminando así el error de paralelaje.

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 bimetal.

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.

La calibración periódica de los manómetros patrón se consigue con el comprobador de manómetros de pesas. Puede verse en la fig. IV.11, y consiste en una bomba de aceite ó 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 rozos. 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 ó 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 (por ejemplo: 0-20 ; 2-100, 30-150; 70-350; 140-700 kg/centímetros cuadrado). La precisión de la medida llega a ser del orden de 0.1%.

El comprobador de manómetros portátil utiliza la misma bomba empleada en el comprobador anterior (fig. IV.11b) y se utiliza para comprobar manómetros e instrumentos de presión, utilizando un manómetro patrón.

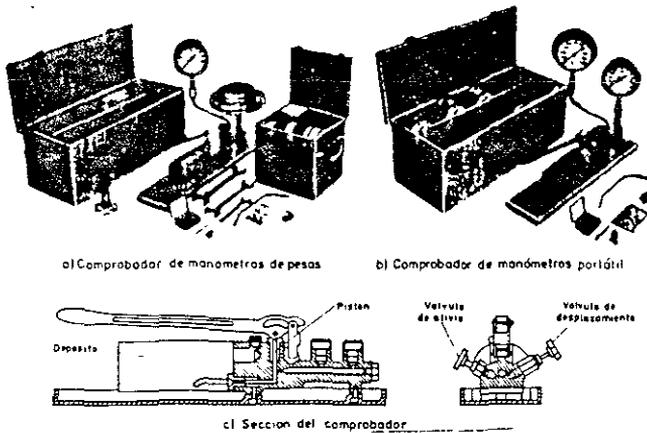


Fig. IV.11.- Comprobador de Manómetros de Pesas.

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. Para presiones bajas, el orden de 1 kg/centímetro cuadrado, se emplean columnas de mercurio portátiles para pruebas en campo ó su fijación mural en el taller de instrumentos. Según el Modelo, disponen de tres tipos de graduaciones: De 0-100 mm columna de mercurio; 0-1.4 Kg/centímetro cuadrado ó de 0-20 lb/pulgado cuadrado. 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 metros de longitud, que tienen así mismo en la parte inferior y superior para medir presión ó vacío, respectivamente. Las columnas de mercurio y agua descritas y un juego de manómetros patrón, se disponen generalmente en un panel ó banco de pruebas de instrumentos que incorpora una bomba de vacío y filtros manoreductores de aire de presión conectados al aire de instrumentos de la Planta.

El conjunto permite comprobar y calibrar instrumentos tales como manómetros y vacuómetros, controladores neumáticos, transmisores de nivel neumáticos y electrónicos, transmisores indicadores y registradores de caudal, y en general, cualquier instrumento que trabaje en el Proceso ó transmita señales neumáticas que estén comprendidas entre los márgenes de presión de los manómetros patrón y de las columnas de agua y de mercurio. En la fig. IV.12 puede verse un esquema del banco de pruebas de instrumentos.

Un instrumento de nivel de presión diferencial se calibra disponiéndolo en el banco de pruebas con la conexión de alta, conectada a un manoreductor y a una columna de agua ó de mercurio para simular el campo de medida; y la conexión de baja conectada a la atmósfera; la parte transmisora neumática ó electrónica se alimenta aparte y su señal de salida va a una columna de mercurio del banco, en caso de señal neumática, ó 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 manoreductor del banco de pruebas. Un instrumento de nivel de desplazamiento se calibra conectándolo a un tubo en "U" 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.

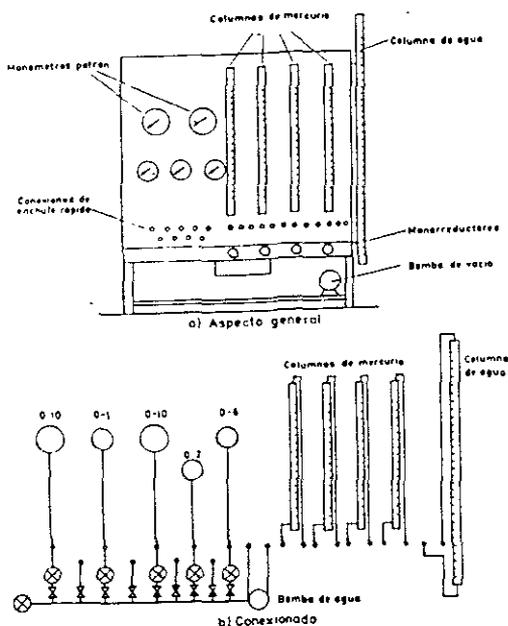


Fig. IV.12.- Banco de Pruebas de Instrumentos.

Una vez calibrado el instrumento basta cambiar el ajuste de densidad, al valor que tenga el líquido de el 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 ó 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 de 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 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 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.

#### IV.4.- Calibración de Instrumentos de Temperatura.

Para la calibración de instrumentos de temperatura, se emplean baños de temperatura como hornos y comprobadores potenciométricos. El baño de temperaturas (fig. IV.13) 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.

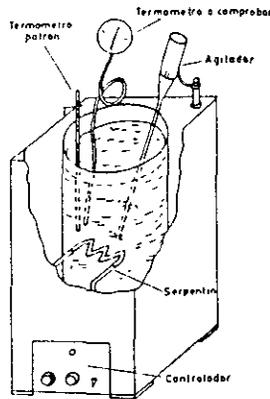


Fig. IV.13. Baño de Temperaturas.

El agitador mueve totalmente el líquido, disminuye los gradientes de temperatura en el seno del líquido y facilita una transferencia rápida de calor; el termómetro patrón es de tipo laboratorio, con una gran precisión; el controlador de temperatura puede ser Todo-Nada, Proporcional ó Proporcional más Integral. Los fluidos empleados en el baño son varios, dependiendo del campo de temperatura de trabajo.

Los hornos de temperatura (fig. IV.14), son hornos de mufla calentados por resistencias eléctricas y con tomas adecuadas para introducir los elementos primarios del instrumento a comprobar. Si bién 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 sales específicas que funden a temperaturas determinadas.

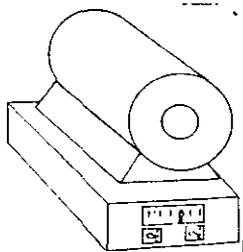


Fig. IV.14.- Hornos de Temperatura.

Los comprobadores potenciométricos se emplean para comprobar las características FEM-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 FEM, combinado con un selector. Esencialmente, el aparato puede medir y generar FEM en c-c 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. La precisión es elevada del orden del 0.2%. En la fig. IV.15 puede verse un modelo de un comprobador potenciométrico.

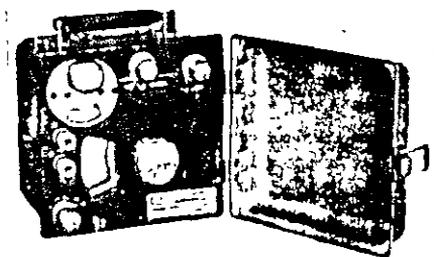


Fig. IV.15.- Comprobador Potenciométrico.

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 los valores de FEM (referidos a  $0^{\circ}\text{C}$ ) se determinan los milivots (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 sitúan 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 milivots (mV) de la temperatura ambiente y de la generada por el termopar.

#### *IV.5.- Comprobación de Válvulas de Control.*

El banco de prueba de válvulas de control, consiste en un juego de bridas, una móvil y 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 fig. IV.16 puede verse un esquema simplificado del circuito oleohidráulico y neumático del banco. Las pruebas que se pueden efectuar en las válvulas de control son:

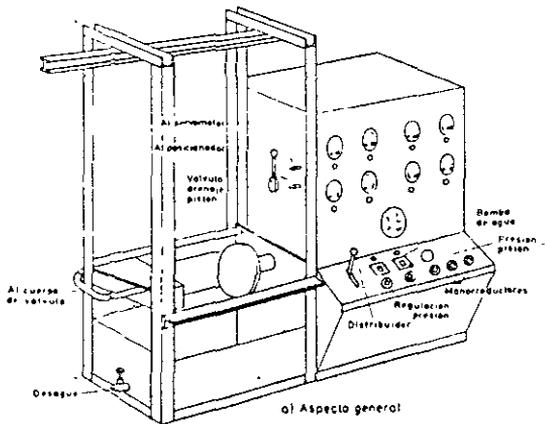
1.- Prueba hidrostática del cuerpo de la válvula bombeando el agua a presión a través de la brida fija.

2.- Prueba de estanqueidad de la estopada.

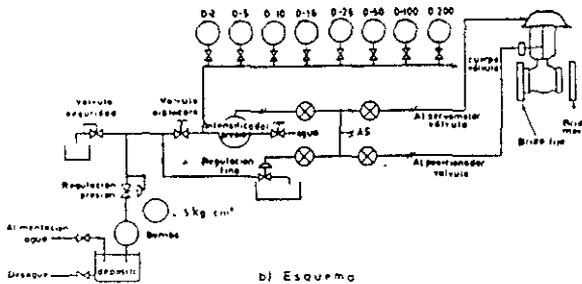
3.- Prueba de estanqueidad de la válvula con el obturador de posición de cierre, midiendo la cantidad de agua de fuga en un tiempo dado y comparándola con la dada por el fabricante de la válvula; una cantidad excesiva indicará un desgaste anormal en el cierre obturador-asiento.

4.- Prueba de funcionamiento de la válvula, medida de su histéresis y calibración de la misma y prueba de posicionador.

Como es natural, las restantes características de la válvula, 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.



a) Aspecto general



b) Esquema

Fig. IV.16.- Banco de Prueba de Válvulas de Control.

#### *IV.6.- Aparatos Electrónicos de Comprobación.*

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 ó corriente de entrada que simule la señal de el Proceso, indicación de la señal de entrada ó salida, comprobación de la sensibilidad, tiempo de respuesta, linealidad e histéresis de los instrumentos y localización rápida de las averías de los lazos de control.

Voltímetro a válvula para mediciones muy exactas de tensiones, empleando tubos de vacío. Difieren de los analizadores universales en su gran sensibilidad al no tener resistencias en serie con el sistema de indicación. Al medir tensiones en c-c , la tensión se aplica a través de un divisor de tensión a la entrada de un amplificador diferencial de corriente continua. La señal de salida alimenta a un puente con un indicador conectado que señala el valor de la tensión.

Las tensiones alternas a medir, se convierten en una tensión continua mediante un circuito rectificador de banda ancha y se aplican en la forma anterior. El voltímetro sirve también para medir resistencias, conectando la resistencia desconocida en paralelo con otra conocida y alimentando el conjunto con una corriente constante. La relación entre las tensiones absorbidas por las dos resistencias es igual a la relación entre los valores de las mismas, por lo cual la pérdida de potencial producida por la resistencia desconocida se aplica a la entrada del amplificador diferencias del instrumento en la forma descrita anteriormente.

Medidor Geiger para verificación y calibración de instrumentos de radiación que emplean isótopos radiactivos.

Estabilizador de tensión, para funcionamiento apto desde carga nula hasta plena carga y utilización para alimentar todos los instrumentos electrónicos del taller.

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 de 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 de 100 Hz.

Analizador Universal, polímetro para medidas generales de tensión, intensidad y resistencia.

Voltímetro Digital de corriente continua, que permite medir tensiones con una precisión de  $\pm 0.1\%$  e incluso de  $\pm 0.01\%$ .

Algunos otros instrumento electrónicos de comprobación son:

- 1.- Comprobador de válvulas.
- 2.- Comprobador de transistores.
- 3.- Megaóhmetro.
- 4.- Oscilador de baja frecuencia.
- 5.- Autotransformador.
- 6.- Estroboscopio.
- 7.- Tacómetros.

Otros accesorios, forman parte del taller de instrumentos y entre ellos se encuentran: Tornos de pequeñas dimensiones, máquinas para limpieza de piezas grandes y medianas, máquinas de taladrar fijas y portátiles, pulidoras, 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, etcétera), equipo especial de soldadura para la fabricación de termopares, etcétera. Herramientas manuales (destornilladores de relojero, pinzas, llaves inglesas y de tubo, limpiadores de plumilla para aparatos registradores, martillos, alicatas, mordazas, sierras de mano, etcétera). Conjuntos de emisor-receptor portátil para intercomunicación en la calibración de instrumentos y detección de averías en la Planta.

## CAPÍTULO V

### APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA INSTRUMENTACIÓN.

#### *V.1.- Generalidades.*

Este Capítulo tiene por objetivo presentar varias Aplicaciones Típicas en la Industria. El hacer este estudio de forma exhaustiva requeriría una obra aparte, ya que no existe prácticamente límite en las Aplicaciones de los Instrumentos en los Procesos Industriales. Este Capítulo se ha limitado pues, a estudiar algunas de las operaciones de Proceso que se utilizan con mayor frecuencia:

- 1.- Calderas de vapor.
- 2.- Secaderos y evaporadores.
- 3.- Hornos de empuje.
- 4.- Columnas de destilación.
- 5.- Intercambiadores de calor.

## *V.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 de tonelada por hora 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:

- 1.- Aportar una energía calorífica suficiente en la combinación del aceite ó del gas con el aire.
- 2.- Desde el punto de vista de seguridad, el nivel debe estar controlado y mantenido dentro de unos límites.
- 3.- Es necesario garantizar una llama segura en la combustión.

### V.2.1.- Control de Combustión.

La regulación de la combustión se basa en mantener constante la presión de vapor en una 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 ó 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 ó 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:

a).- Caudal aceite-caudal aire en serie.- En el primer esquema de funcionamiento que puede verse en la fig. V.1a, el controlador de presión ajusta el punto de consigna del controlador de caudal de aceite, y esta variable actúa a través del relé de relación aceite-aire, como punto de consigna del controlador de aire. Como las variaciones del caudal de aceite 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 aceite cambia antes que el del aire de combustión. Si se limita el caudal de aceite, 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 aceite continúa circulando.

b).- Caudal aire-caudal aceite en serie.- Tal como puede verse en la fig. V.1b, aquí la señal de aire ajusta a través del relé de relación, el controlador de aceite. El Sistema es más seguro que el anterior, ya que elimina la posibilidad de formación de una mezcla explosiva cuando falla la señal de aire de combustión.

c).- Presión de vapor-caudal de aceite en serie/caudal vapor-caudal aire en serie.- El Sistema representado en la fig. V.1c, se caracteriza por mantener con más seguridad la relación correcta aire-aceite, aunque el aceite no sea medido correctamente. El controlador de presión de vapor ajusta el controlador de caudal de aceite. 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.

d).- Caudal aire-caudal de aceite en paralelo.- La ventaja principal de este Sistema, que puede verse en la fig. V.1d, es su control directo en el aceite y en el aire. De hecho, para mantener una relación correcta de aceite-aire conviene incorporar al sistema un relé de relación manual.

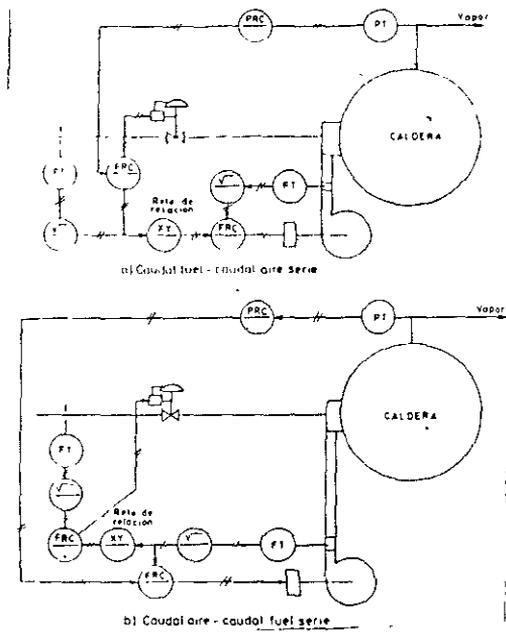
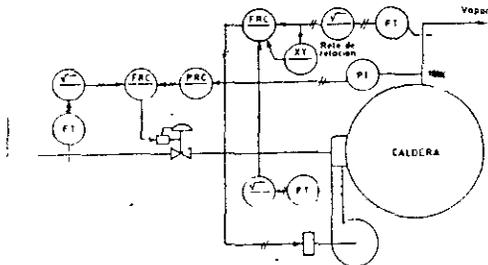
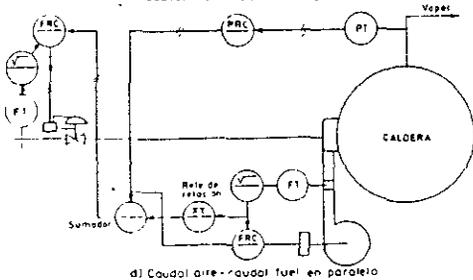


Fig. V.1.- Control de Combustión.



c) Presión de vapor - caudal fuel serie  
Caudal vapor - caudal aire serie



d) Caudal aire - caudal fuel en paralelo

Fig. V.1.- Control de Combustión (Continuación).

### *V.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. En la regulación de nivel de un elemento representada en la fig. V.2c, 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 ó 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. V.2a). 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. V.2b) 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 fig. V.2d, 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.

La regulación de tres elementos elimina el fenómeno de oscilación del nivel de agua que se produce cuando el caudal de vapor crece ó disminuye rápidamente. 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:

- 1.- Caudal de vapor.
- 2.- Caudal de alimentación de agua.
- 3.- Nivel de agua.

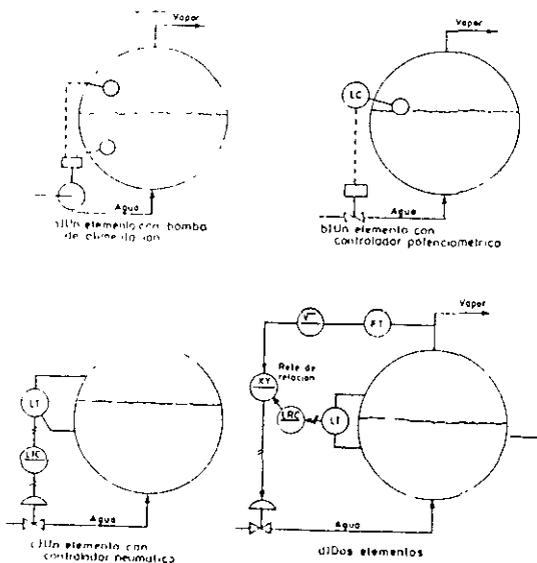


Fig. V.2.- Control de Nivel.

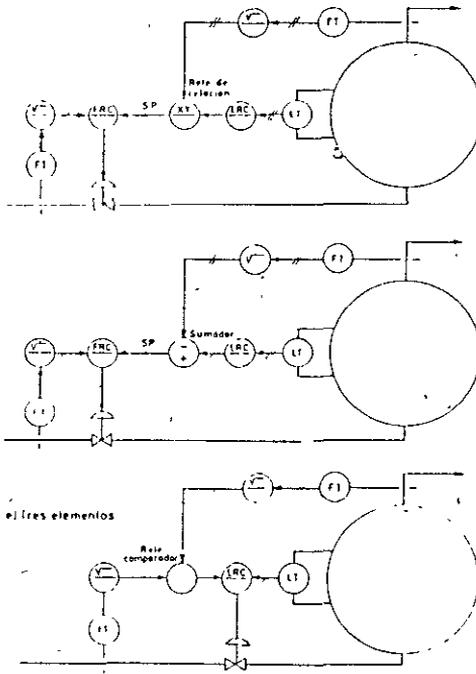


Fig. V.2.- Control de Nivel. (Continuación).

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 funciones en las tres variables, los instrumentos correspondientes pueden estar relacionados entre sí de varias formas. Las más representativas se encuentran en la fig. V.2e y todas tienen por objetivo 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.

Se señala que la medida del caudal 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 ó de una tobera.

### *V.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:

- 1.- Prebarrido, es decir; limpieza de los gases que pueden haberse acumulado desde la última combustión.
- 2.- Encendido de la llama piloto.
- 3.- Encendido de la llama principal.
- 4.- Paro de la instalación según un enclavamiento secuencial en el que intervienen los elementos: Fallo de llama, presóstato de baja presión del gas, alarma de nivel de la caldera, etcétera.
- 5.- Postbarrido, fase en que se limpian los gases quemados.

El circuito de llama (Detector+Relé) dispone además de un 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 de 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 periódicamente la radiación de la llama hacia el detector, momento en el cual se autocomprueba el circuito. Cualquier fallo detectado hace parar la instalación.

### V.3.- Secaderos y Evaporadores.

Los secaderos tienen por objetivo 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 de el producto en forma continua, se controla en su lugar, la temperatura variable que depende indirectamente de la humedad. En la fig. V.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 auxiliares, tales como vigilancia de llama, válvula autorreguladora de presión para inyectar vapor al aceite y pulverizarlo, 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 través del cual circula aire caliente. En la fig. V.4 puede verse un esquema del control de el proceso observándose que, análogamente el secadero de evaporación rápida, el control suele ser en cascada PID. Otro tipo de secador es el de doble cilindro rotativo, representado en la fig. V.5 que fue uno de los primeros sistemas que se empleó para secar.

Consiste en dos cilindros rotativos calentados con vapor que gira en sentidos opuestos hacia adentro muy poco separados y arrastrando una película de el Producto. 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 en la regulación de presión de vapor.

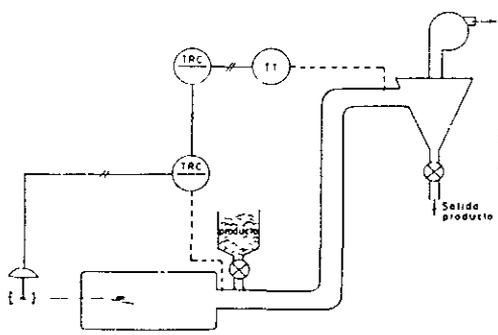


Fig. V.3.- Secadero de Evaporación Rápida.

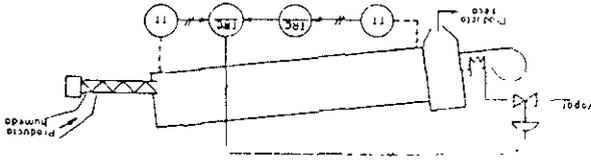


Fig. V.4.- Secadero Rotativo.

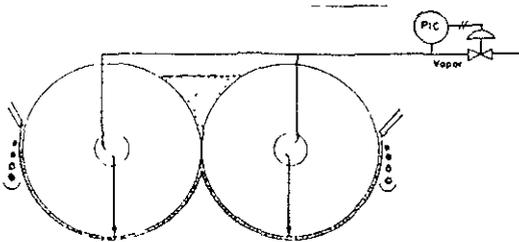


Fig. V.5.- Doble Cilindro Rotativo.

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 bién los más comunes son los dos últimos. En la fig. V.6 se representa un evaporador de sólo un efecto.

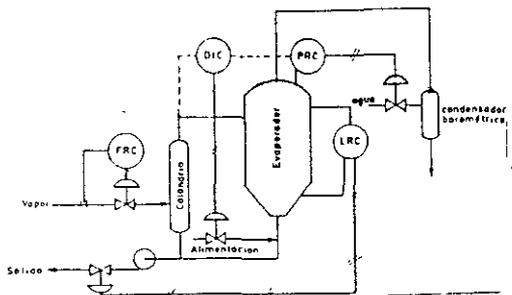


Fig. V.6.- Evaporador de Triple Efecto.

Se establece un caudal fijo de vapor a la calandria, se controla el nivel del evaporador variando la entrada de el Producto, y se regula la concentración midiendo al elevación del punto de ebullición, es decir; la diferencia de temperaturas entre el líquido de ebullición en el evaporador y el condensado a la misma presión absoluta, y actuando sobre la salida de el Producto. 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 la posible obturación del elemento. Se controla así mismo la presión absoluta en el cuerpo del evaporador, actuando sobre la entrada de aire ó bien sobre la entrada del agua que va al condensador barométrico caso de utilizar este sistema para generar el vacío.

En la fig. V.7 puede verse la regulación de un triple efecto. Excepto el primer efecto, los otros dos se calientan con el vapor de el 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 a el Proceso. Los instrumentos de control son similares a los del evaporador de un sólo efecto.

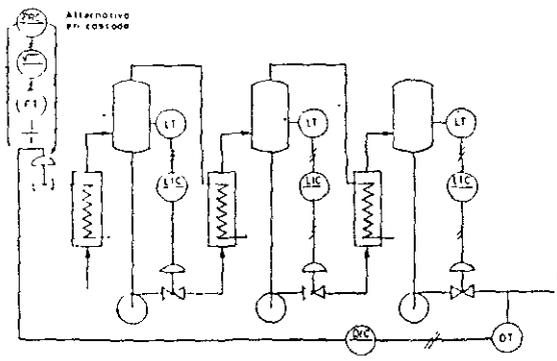


Fig. V.7.- Evaporador de Triple Efecto.

#### *V.4.- 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 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 (fig. V.8). 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 correctamente 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 ó de platino platino-rodio, según sean las temperaturas alcanzadas y con fundas cerámicas de mullita sílice-alumínica ó 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 ó bien sobre una válvula de solenoide, ó 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 ó flotante ó bien por un regulador Proporcional ó Proporcional+Integral ó Proporcional+Integral+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 ó 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.

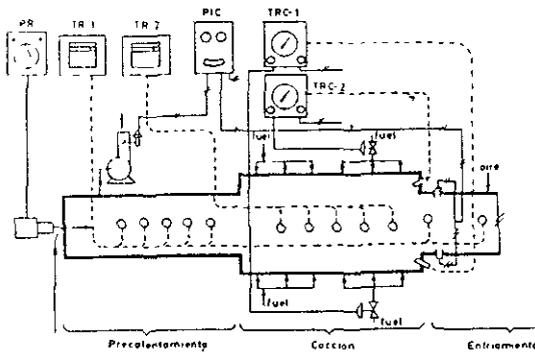


Fig. V.8.- Esquema de la Regulación de un Horno Túnel Típico.

### *V.5.- Columnas de Destilación.*

La Operación de Destilación consiste en separar una mezcla por diferencia de composición entre un líquido y un vapor. Esta operación se realiza en forma continua en las denominadas columnas ó 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 ó menos pesados.

Los problemas de la destilación son muy diversos por lo cual los tipos de columnas lo son también. Se analizará una columna típica de funcionamiento continuo que está representada en la fig. V.9. Las variables importantes que regulan el funcionamiento de la columna son la presión de 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. A 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 ó en un plato intermedio de la columna.

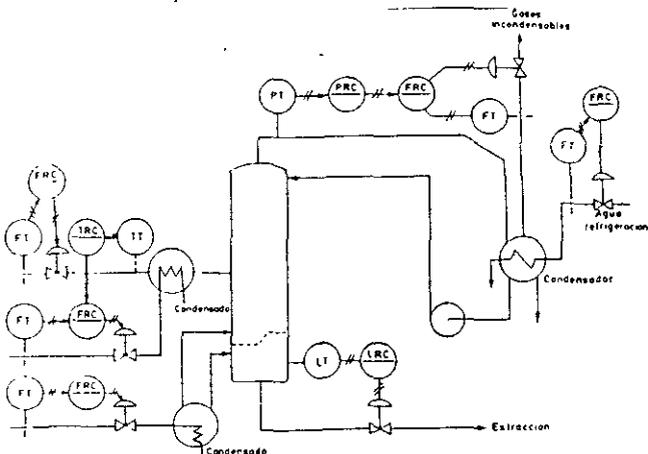


Fig. V.9.- Columna de Destilación.

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 un condensador de los gases que salen de la cabeza de la columna. Un controlador de caudal de agua de refrigeración del condensador ajusta estas calorías.

El caudal de destilado se ajusta mediante un controlador del 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 del 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 Ordenador que se aplica siempre que los estudios económicos así lo aconsejen.

## *V.6.- Intercambiador de Calor.*

La gran mayoría de los Procesos Industriales emplean intercambiadores de calor en operaciones tales como precalentamiento, pasteurización 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 ó de fluido de alimentación, las fluctuaciones en el caudal de el Producto, las variaciones de la temperatura de el Producto, en su calor específico, los retardos de el Proceso, etcétera.

En la fig. V.10 a puede verse un esquema de control simple con un controlador de temperatura que actúa directamente sobre la válvula de vapor. En otro sistema (fig. V.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 de el Producto que manda una válvula de control en la línea de salida del condensador. 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 de el Producto, el controlador de temperatura manda cerrar la válvula y el serpentín tarda cierto tiempo en llenarse del condensado del vapor con el resultado en 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 variable del sistema anterior se aplica cuando la presión del condensador es baja y existen problemas en su eliminación, es la sustitución del purgador clásico del condensado por un control de nivel del condensado (fig. V.10c).

La temperatura de el Producto continúa siendo regulada por un controlador convencional actuando sobre la válvula de vapor. Otro sistema es el control en cascada (fig. V.10d) 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.

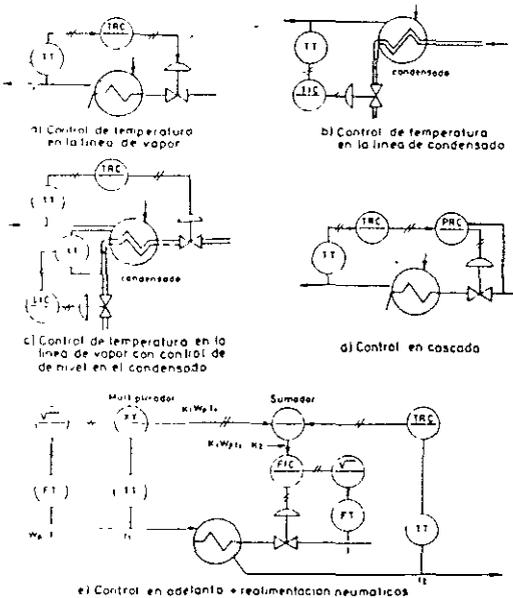


Fig. V.10.- Intercambiador de Calor de Vapor.

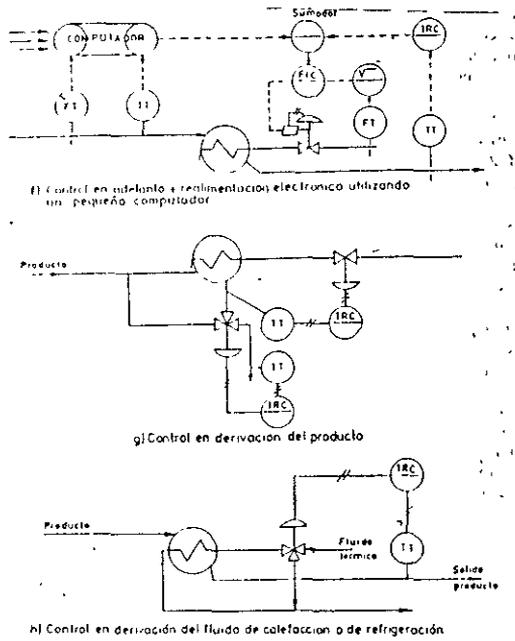


Fig. V.10.- Intercambiador de Calor de Vapor (Continuación).

El control en adelanto (*"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 costo elevado de la instrumentación implicada. Idealmente, la ecuación que debe resolver continuamente el control en adelanto es la:

$$W_v q_v = W_p c_p (t_2 - t_1)$$

en la que:

$W_v$  = Caudal de vapor en peso (kg/h).

$q_v$  = Calor de condensación de vapor.

$W_p$  = Caudal de el Producto en peso (Kg/h).

$c_p$  = Calor específico de el Producto.

$t_1$   $t_2$  = Temperaturas del producto a la entrada y a la

salida, respectivamente, prescindiendo del rendimiento del intercambiador.

Esta ecuación puede transformarse a:

$$W_v q_v = W_p c_p t_2 - W_p c_p t_1$$

es decir, en otros términos:

$$\text{Posición válvula de control} = K_1 W_1 t_1 - K_2$$

ya que  $t_2$  se mantiene constante.

De este modo, un instrumento multiplicador realiza la operación  $K_1 W_1 t_1$

y otro sumador le resta a esta señal la  $W_2 t_2$  obtenida de la señal de

temperatura  $t_2$  combinándose así el control en adelante y el de realimentación

(fig. V.10 e). En la fig. V.10 f puede verse el mismo tipo de control pero utilizando un Ordenador. En los casos de intercambiadores de calor entre líquidos, es usual estabilizar la temperatura de líquido de calefacción ó refrigeración en un sistema separado. Cuando el intercambiador de calor tiene una respuesta demasiado lenta, el mantenimiento de temperatura de el Producto se realiza con un controlador de temperatura actuando sobre una válvula de tres vías diversora, 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 (fig. V.10 g).

Una variable 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 ó de refrigeración en un sistema separado. En la fig. V.10h 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 de cascada con la temperatura de fluido térmico con variable secundaria.

### *V.7.- Control de el Reactor en una Central Nuclear.*

En una Central Térmica Convencional se utiliza una caldera de vapor con un quemador de aceite ó gas (ó bién carbón). El calor generado se transfiere al agua de la caldera a través de 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 tanto, la potencia de salida. Sin embargo, se señala que desde un punto de vista simplificado, la caldera de la central térmica es compleja la potencia de salida gobierna el caudal de combustible ó el aire de combustión combinados en la mezcla adecuada, establece el número de quemadores a utilizar y en muchas plantas fijas la temperatura de sobrecalentamiento (mientras que la central nuclear es básicamente más simple) sólo se requiere el control de consumo del combustible nuclear. La producción de la energía en el reactor nuclear se logra mediante la fisión de los tomos del material combustible por el bombardeo con neutrones.

El número de éstos, da una medida aproximada a 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 flujo de refrigeración, la posición de las barras de control y las calorías da 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 fig. V.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 de flujo, lo que permite determinar la distribución de potencia dentro del reactor y calibrar los detectores de flujo externos.

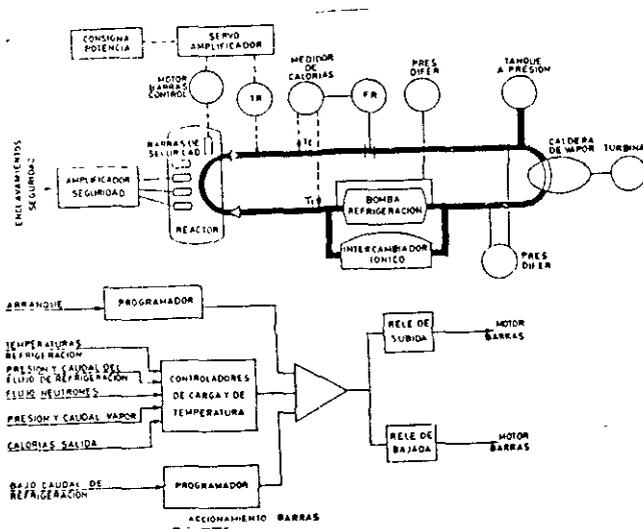


Fig. V.11.- Esquema de Control del Reactor Nuclear.

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 aceite ó gas) y la emergencia puede ser debida a fallos de presión en la línea ó de caudal de aire de combustión, en la central nuclear el paro puede presentarse por pérdida del caudal del refrigerante primario ó aumento exagerado de la potencia de salida hasta un nivel de seguridad. 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:

1.- Aislamiento del sistema de contención mediante una válvula de bloqueo en cada línea que penetra en las paredes del reactor.

2.- Mantenimiento del sistema de barras de control y de seguridad en su posición. Si el sistema falla por manipulación incorrecta ó fallas del sistema de movimiento se produce una liberación de radiactividad que causa un gran desprendimiento de calor. Para eliminarlo, sea en caso de emergencia ó 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 se señala que efectúan su carrera completa en un poco más de medio segundo.

Los criterios establecidos por la seguridad de la central nuclear, se basan en la confiabilidad y 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 fallas con el reactor en marcha mediante los sistemas redundantes de instrumentos, etcétera.

El dispositivo de seguridad es excitado principalmente ante una falla de alimentación de los instrumentos, una temperatura alta en la refrigeración, un nivel de potencia de salida excesivo ó un flujo elevado de neutrones.

El sistema de arranque del reactor debe tener en cuenta la gama más amplia de niveles de potencia que el reactor puede generar y debe realizar los siguientes puntos:

1.- Impedir que el grado de aumento del flujo de neutrones sea excesivamente rápido.

2.- Impedir que la reactividad exceda de los límites máximos de proyecto dentro de la gama de potencias de trabajo.

3.- Mantener la adecuada generación de calor en respuesta a la demanda.

4.- La instrumentación no nuclear incluida en el lazo de 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, etcétera.

## CONCLUSIONES

En los últimos años se ha incrementado rápidamente el interés en los sistemas de control adaptativo, junto con el interés y progreso de los tópicos de control en general. El término "*sistema adaptativo*" tiene una variedad de significados específicos, pero habitualmente implica que el sistema tiene capacidad de acomodarse a modificaciones ambientales imprevisibles, a medida que esas modificaciones se producen dentro del sistema ó fuera de él. Este concepto tiene un gran atractivo para el proyectista de sistemas, pues un sistema altamente adaptativo, además de acomodarse a los cambios ambientales, podría adaptarse a moderados errores de diseño ó incertidumbres de Ingeniería, y también compensaría las fallas de componentes menores del sistema, aumentando de ese modo la confiabilidad del sistema.

En la mayor parte de los sistemas de control realimentado, pequeñas desviaciones en los valores de los parámetros con respecto a sus valores de proyecto, no producen ningún problema en el funcionamiento normal del sistema, siempre que esos parámetros estén dentro del lazo. Sin embargo, si los parámetros de la Planta varían ampliamente de acuerdo con cambios ambientales, el sistema de control puede presentar una respuesta satisfactoria para una condición ambiental, pero puede dejar de hacerlo bajo otras condiciones. En ciertos casos, variaciones grandes de los parámetros de la Planta pueden llegar aún a causar inestabilidad.

En el análisis más simple, se pueden considerar diferentes conjuntos de valores de los parámetros de la Planta. Es deseable proyectar un sistema de control que funcione bien para todos los conjuntos de valores. En cuanto se formula esta demanda, el problema del control estrictamente óptimo pierde su importancia. Si se pide un buen comportamiento en un amplio campo, hay que abandonar el comportamiento óptimo para un determinado juego de parámetros.

Si se puede identificar continuamente la función de transferencia de la Planta, se pueden compensar las variaciones en la función transferencia de la misma, simplemente variando los parámetros ajustables del control y, por lo tanto; obtener un funcionamiento satisfactorio del sistema en forma continua bajo las diversas condiciones ambientales.

Un método adaptativo así es muy útil para enfrentar un problema en que la Planta está normalmente expuesta a medios ambientes variables, de modo de los parámetros de la Planta se modifican de tiempo en tiempo. La adaptación es una característica fundamental de los seres vivos que intentan mantener el equilibrio fisiológico en medio de condiciones ambientales variables. Un procedimiento para proyectar un sistema adaptativo es, entonces, considerar los aspectos adaptativos del comportamiento humano ó animal y desarrollar sistemas que en alguna medida se comporten análogamente.

En la literatura actual, hay varias definiciones distintas de los sistemas de control adaptativo. La vaguedad que rodea a la mayor parte de las definiciones y clasificaciones de los sistemas adaptativos, es debida a la gran variedad de mecanismos por los que se puede lograr la adaptación y a una falla en diferenciar entre manifestaciones externas de comportamiento adaptativo y los mecanismos internos utilizados para lograrlo.

Un sistema adaptativo es un sistema que continúa y automáticamente mide las características dinámicas (como la función de transferencia) de la Planta, las compara con las características dinámicas deseadas y usa la diferencia para variar parámetros ajustables del sistema (generalmente características del controlador), ó para generar una señal de accionamiento de modo que se pueda mantener el funcionamiento óptimo con independencia de los cambios ambientales. Para que pueda denominarse adaptativo a un sistema, debe tener características de auto-organización. Si se realiza el ajuste de los parámetros del sistema únicamente por medición directa del medio, el sistema no es adaptativo.

Finalmente, el desarrollo del análisis instrumental se produjo en forma paralela al de la electrónica, dado que la generación, transducción, amplificación y presentación final de una señal se puede hacer en forma rápida y conveniente por medio de circuitos electrónicos. Se han desarrollado numerosos transductores para convertir señales de cualquier tipo, en señales eléctricas, lo que hace posible realizar una amplificación considerable de la señal transducida. A su vez, estas señales eléctricas se presentan fácilmente por medio de medidores de aguja y cuadrante, registradores ó unidades digitales.

Por ejemplo, el análisis químico proporciona información sobre la composición de una muestra de materia.

Algunos análisis dan resultado de tipo cualitativo y aportan información útil en la que pueden reconocerse especies atómicas ó moleculares, deducirse características estructurales de las mismas ó reconocer en la muestra la presencia de determinados grupos funcionales. Otros análisis son de tipo cuantitativo; en éstos los resultados se representan como datos numéricos y se expresan como porcentaje, partes por millón ó miligramos por litro. En ambos tipos de análisis la información necesaria se obtiene por medio de la medida de una propiedad física que se relaciona en forma característica con el ó los componentes de interés.

Las propiedades que se utilizan para conocer la composición química de la muestra pueden denominarse "*señales analíticas*". Como ejemplo de este tipo de señales cabe citar la emisión ó la absorción de luz, la conductancia, el peso, el volumen y el índice de refracción; pero ninguna es exclusiva de una especie dada; así por ejemplo, todos los elementos metálicos presentes en una muestra cuando se calientan en un arco eléctrico a una temperatura suficientemente elevada, emiten por lo general radiación ultravioleta ó visibles; todas las especies cargadas conducen la electricidad y todos los componentes de una mezcla contribuyen a su peso, su volumen y su índice de refracción. En consecuencia, en todos los procedimientos analíticos es necesario realizar una separación. En algunos casos esta etapa consiste en la separación física de los componentes químicos individuales que están presentes en la muestra antes de la generación de la señal analítica.

En otros casos se genera y se observa la señal en la muestra entera, luego se aísla ó se separa la señal deseada. Con cierto tipo de señales es posible realizar este tipo de separación, mientras que en otras no lo es.

Por ejemplo, cuando se calienta una muestra en el arco eléctrico, la distribución de la radiación de cada especie metálica es característica y propia de esa especie. En consecuencia, la separación de las longitudes de onda por medio de un dispositivo adecuado; por ejemplo, un espectroscopio, hace posible la identificación de cada componente sin que sea necesario separarlo físicamente. En cambio, no existe ningún método general que permita diferenciar la conductancia de los iones de sodio y de la causada por los iones de potasio.

Por tanto, si se requiere utilizar la conductancia como señal para el análisis de una de estas especies iónicas en una muestra que también contenga la otra, será necesario realizar la separación física de ambas especies.

## BIBLIOGRAFÍA

### “INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA Y MEDICIONES”.

David Cooper.            Edit. Prentice-Hall  
2° Edic.

### “INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL”.

Antonio Creus.            Edit. Marcombó.  
2° Edic.

### “DIGITAL CONTROL OF DYNAMIC SYSTEMS”.

Franklin.                 Edit. Addison-Wesley.  
Second Edition.

### “MÉTODOS EXPERIMENTALES PARA INGENIEROS”.

J. P. Holman.            Edit. Mc Graw-Hill.  
3° Edic.

“INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA”.

K. Ogata.                      Edit. Prentice-Hall.  
3° Edic.

“ANÁLISIS INSTRUMENTAL”.

D. A. Skoog.                      Edit. Mc Graw-Hill.  
2° Edic.

## ÍNDICE

<u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
<u>JUSTIFICACIÓN</u> .....	3
<u>ANTECEDENTES AL TRABAJO</u> .....	5
<u>PLAN PROPUESTO</u> .....	7
<u>OBJETIVO GENERAL</u> .....	12
<u>OBJETIVOS PARTICULARES</u> .....	12
<u>CAPÍTULO I.- GENERALIDADES DE LA INSTRUMENTACIÓN</u> .....	14
I.1.- Definiciones e Instrumentación .....	14
I.2.- Definiciones en Control .....	21
I.3.- Clases de Instrumentos .....	25
I.3.1.- En Función del Instrumento .....	25
I.3.2.- En Función de la Variable de Proceso .....	28

<i>CAPÍTULO II.- ELEMENTOS TRANSMISORES</i> .....	38
II.1.- Generalidades .....	38
II.2.- Transmisores Neumáticos .....	41
II.2.1.- Bloque Amplificador de Una y Dos Etapas .....	41
II.2.2.- Transmisor de Equilibrio de Movimientos .....	53
II.2.3.- Transmisor de Equilibrio de Fuerzas .....	55
II.2.4.- Transmisor de Equilibrio de Momentos .....	56
II.3.- Transmisores Electrónicos .....	57
II.3.1.- Transmisores Electrónicos de Equilibrio de Fuerzas .....	57
II.3.1.1.- Detector de Posición de Inductancia .....	58
II.3.1.2.- Transformador Diferencial .....	60

<u>CAPÍTULO III.- FUNDAMENTOS DE REGULACIÓN</u> <u>AUTOMÁTICA</u> .....	61
III.1.- Introducción .....	61
III.2.- Características de el Proceso .....	62
III.3.- Sistemas de Control Neumáticos y Electrónicos .....	69
III.3.1.- Control Todo-Nada .....	70
III.3.2.- Control Flotante .....	73
III.3.3.- Control Proporcional de Tiempo Variable .....	75
III.3.4.- Control Proporcional .....	77
III.3.5.- Control Proporcional+Integral .....	83
III.3.6.- Control Proporcional+Derivado .....	88
III.3.7.- Control Proporcional+Integral+Derivado .....	94
III.3.8.- Cambio Automático-Manual-Automático .....	96
III.4.- Sistemas de Control Electrónicos .....	101
III.4.1.- Generalidades .....	101
III.4.2.- Control Todo-Nada .....	105
III.4.3.- Control Proporcional de Tiempo Variable .....	107
III.4.4.- Control Proporcional .....	110
III.4.5.- Control Integral .....	112
III.4.6.- Control Derivativo .....	115
III.4.7.- Control Proporcional+Integral+Derivativo .....	118
III.4.8.- Cambio Automático-Manual-Automático .....	119

III.5.- Control por Ordenador .....	120
III 5.1.- Generalidades .....	120
III.5.2.- Control DDC .....	124
III.5.3.- Control Supervisor .....	130
III.5.4.- Otros Tipos de Control .....	132
III.6.- Evolución de la Instrumentación .....	133

CAPÍTULO IV.- CALIBRACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS ..... 148

IV.1.- Introducción .....	148
IV.2.- Error de los Instrumentos. Procedimiento General de Calibración .....	151
IV.3.- Calibración de los Instrumentos de Presión, Nivel y Caudal ...	162
IV.4.- Calibración de Instrumentos de Temperatura .....	168
IV.5.- Comprobación de Válvulas de Control .....	172
IV.6.- Aparatos Electrónicos de Comprobación .....	174

<u>CAPÍTULO V.- APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA INSTRUMENTACIÓN</u> .....	177
V.1.- Generalidades .....	177
V.2.- Calderas de Vapor .....	178
V.2.1.- Control de Combustión .....	179
V.2.2.- Control de Nivel .....	183
V.2.3.- Seguridad de Llama .....	187
V.3.- Secaderos y Evaporadores .....	188
V.4.- Horno Túnel .....	194
V.5.- Columnas de Destilación .....	196
V.6.- Intercambiador de Calor .....	199
V.7.- Control del Reactor en Una Central Nuclear .....	205
<u>CONCLUSIONES</u> .....	209
<u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	213
<u>ÍNDICE</u> .....	215