

FRANCISCO VELASCO APARICIO

**ANALIZADORES DE PROCESO
EN LÍNEA**

Introducción a sus técnicas analíticas



©Francisco Velasco Aparicio, 2015
Reservados todos los derechos.

«No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.»

Ediciones Díaz de Santos
Internet: <http://www.editdiazdesantos.com>
E-mail: ediciones@editdiazdesantos.es

ISBN:978-84-9969-953-0
Depósito Legal: M-16959-2015

Fotocomposición: P55 Servicios Culturales
Diseño de cubierta: ISA y P55 Servicios Culturales

Printed in Spain - Impreso en España



FRANCISCO VELASCO APARICIO es Perito Industrial Mecánico.

Nació en Cartagena. Su primer contacto con la tecnología lo tuvo en la Escuela Técnica de la Empresa Nacional Bazán –actual Navantia–, empresa donde trabajó como Delineante mientras cursaba sus estudios.

Durante 22 años trabajó en Control y Aplicaciones S. A. (actual CYMISA). Desde 1974 a 1976 colaboró con la Central de Ingeniería de REPESA en Madrid, en la instrumentación de la nueva refinería de Tarragona y redactando las primeras Especificaciones Generales de Instrumentación de la Compañía.

Posteriormente pasó a formar parte de Dumez Copisa Sistemas, S. A. –actual Denion Control y Sistemas, S. A.– como jefe del Departamento de Instrumentación y Sistemas de Analizadores.

Ha dirigido importantes proyectos de *sistemas de analizadores de proceso* destinados a diversos sectores de la industria: refino de petróleo, química, energía, petroquímica, etc. Proyectos tanto para usuarios finales como para Ingenierías. Redactó para REPSOL la versión original de las Especificaciones de Sistemas de Analizadores. La ED-J7 “Sistemas de Analizadores de Proceso”.

Ha publicado artículos en revistas especializadas y mantiene una página web dedicada a Sistemas de analizadores: <http://www.proyectoicue.com>. Ha impartido cursos de formación en diversas empresas, tanto para usuarios finales como para integradores especialistas en analizadores.

Fue galardonado con el premio al Profesional del Año de la Sección Española de ISA en 2012, por toda una vida profesional.

Acerca del autor	VII
Dedicatoria.....	IX
Agradecimientos	XIII
Presentación	XV
Prólogo.....	XVII
Glosario de términos y acrónimos	XIX
Notas	XXV

PARTE I. Analizadores y sus técnicas analíticas

1. Analizadores de proceso en línea. General	3
2. Cromatografía.....	23
3. Absorción de infrarrojos.....	55
4. Fotometría UV. H ₂ S/SO ₂ . Plantas de recuperación de azufre.....	71
5. Espectrometría de masas	81
6. Espectrometría de movilidad iónica (IMS)	109
7. FTIR - FTNIR	117
8. Titración automática	135
9. Otras técnicas analíticas	145
10. Color	165
11. Destilación.....	173
12. Densidad de líquidos	187
13. Índice de refracción	197
14. Punto de cristalización (<i>Freezing Point</i>).....	207
15. Punto de niebla (<i>Cloud Point</i>).....	213
16. Punto de vertido (<i>Pour point</i>).....	219
17. Punto de obstrucción de filtro frío	227
18. Presión de vapor.....	231
19. Punto de inflamación (<i>Flash Point</i>).....	241
20. Número de octano	249
21. Número e índice de cetano	269
22. Viscosidad.....	279
23. Azufre total en hidrocarburos-"Sulfur in oil"	289
24. H ₂ S. Cinta de acetato de plomo	299
25. Nitrógeno en hidrocarburos	307
26. Sal en crudo.....	311
27. Humedad.....	317

28. Control de combustión	333
29. Metales en líquidos de proceso.....	349
30. Oxígeno	359
31. Hidrógeno. Conductividad térmica.....	375
32. Poder calorífico - Índice de Wobbe	383
33. Óxidos de nitrógeno, NOx	399
34. Densidad de gases.....	415
35. SO ₂ . Fluorescencia UV pulsante.....	425
36. Calidad del aire. Emisiones. Generalidades y medida de partículas y caudal de gases.....	435
37. Calidad de aire. Inmisiones	503
38. Medida del pH.....	519
39. Conductividad	535
40. Carbono orgánico total (COT - TOC)	553
41. Contenido de cloro.....	567
42. Demanda de oxígeno.....	579
43. Hidrocarburos en agua o condensado.....	593
44. Interfases.....	605
45. Oxígeno disuelto.....	617
46. Turbidez.....	629
47. Otros contaminantes del agua	651

PARTE II. Sistemas de analizadores

48. Sistemas de analizadores	673
49. Especificación de analizadores	727
50. Especificación de sistemas	745
51. Calibración de analizadores de proceso	761
52. Mantenimiento de analizadores.....	773

PARTE III. Detección de gases

53. Detección de gases y fuego	807
--------------------------------------	-----

PARTE IV. Anexos

• Bibliografía.....	845
• Direcciones	849
• Índice analítico.....	855

A mediados de 1998 comencé a ordenar una serie de apuntes con datos relevantes de algunos analizadores de proceso, datos tomados durante mi ejercicio profesional como responsable del Departamento de Instrumentación y Sistemas de Analizadores de Denion Control y Sistemas, S. A. en Barcelona, España.

Esos apuntes se convirtieron en una serie de temas y especificaciones de algunos tipos de analizadores, así como de los sistemas auxiliares –acondicionamiento de muestras, diseño de casetas, etc.: temas descriptivos que fueron puestos a disposición pública en: www.proyectoicue.com.

Aquellos temas, revisados, ampliados y puestos al día y gracias al patrocinio de la Sección Española de ISA, se han agrupado en el presente volumen. Además se han incluido diversos capítulos sobre diseño y especificación de sistemas, calibración y mantenimiento de analizadores, así como un capítulo dedicado a detección de gases y fuego.

El objetivo del texto ha sido describir las bases de las técnicas analíticas más usadas en la industria, con una somera descripción de los analizadores de proceso que las utilizan, que complementa la explicación de la técnica respectiva. No hay que olvidar que, en algunos casos, no es posible describir una técnica analítica en sí misma sin describir el correspondiente analizador.

Dado que la preparación de este libro ha consistido, básicamente y en su mayor parte, en buscar información, estructurarla y, en algunos casos, traducirla, es de justicia destacar que el mérito de la información contenida es de los autores correspondientes. Los errores, fallos de traducción o faltas de interpretación, esos, son solo míos.

Como siempre, este trabajo está pensado para los técnicos de analizadores que viven, trabajan y piensan en Español. Espero que les sea de utilidad.

ISA (International Society of Automation) es una asociación internacional de profesionales sin ánimo de lucro procedentes del entorno de la instrumentación y el control de procesos, que tiene como misión la gestión y difusión del conocimiento en el área técnica.

ISA España se creó en el año 1998 con el objeto de impulsar la divulgación de tecnologías en el sector de la instrumentación y el control de procesos de nuestro país, y ser el punto de encuentro de la comunidad de automatización en el ámbito nacional, organizando para ello reuniones técnicas, conferencias, cursos, publicaciones y grupos de trabajo.

Hace unos años, la Sección Española de ISA decidió emprender la iniciativa de la edición de libros técnicos en castellano, con objeto de reforzar el apoyo al desarrollo de los técnicos de automatización y favorecer la divulgación del conocimiento de los profesionales del sector.

Animados por la excelente acogida de las dos publicaciones anteriores: *Sistemas Instrumentados de Seguridad* (Inmaculada Fernández *et al.*, 2012) y *Válvulas de Control: Selección y Cálculo* (Antonio Campo, 2014), es de nuevo un honor para ISA España poder presentar el libro *Analizadores de Proceso en Línea: Introducción a sus técnicas analíticas* (Francisco Velasco, 2015).

Francisco Velasco comparte en esta obra su experiencia y conocimiento en los analizadores de proceso en línea, lo que sin duda servirá de referencia, consulta y apoyo para cualquier profesional interesado en la materia.

Soportado por consejos prácticos y aplicaciones industriales reales, el libro recoge el amplio espectro de temáticas relacionadas con esta disciplina. Tras la introducción de los fundamentos de las distintas técnicas y tecnologías analíticas, se estudia la problemática concreta de medidas específicas, análisis de gases, calidad del agua y aire, así como las particularidades de la detección de fuego y gas. Se incluyen aspectos relacionados con la definición, especificación y selección de sistemas de analizadores, finalizando con las labores de calibración y mantenimiento, considerando aspectos tanto teóricos como prácticos, basados en la profunda experiencia del autor.

Quisiera agradecer a Francisco Velasco su dedicación, motivación y apoyo a la labor de divulgación de la Sección Española de ISA con este excelente trabajo. Extender mi gratitud a Jose Carlos Córdoba, por la constancia en la coordinación de la obra, así como a todos los colaboradores: Francisco Arista, Xisco Brunet, Eva Franco, Pedro Maturana, John Medcalf y J.A. González Viaga, por su generosa participación en la revisión. Gracias a Francisco Díaz-Andreu y Fernando Trucharte, por su constante compromiso con ISA España y con la iniciativa de edición de libros técnicos en castellano.

Deseamos que este libro sea de interés para la comunidad de automatización y refleje el esfuerzo con el que ha sido escrito.

PARTE I

ANALIZADORES Y SUS TÉCNICAS ANALÍTICAS

ANALIZADORES DE PROCESO EN LÍNEA. GENERAL

SUMARIO: Introducción. Instrumentos de medida y control. Un poco de historia. Clases de analizadores. El papel de los analizadores en sistemas de control de procesos. Parámetros esenciales de un analizador. Ley de Beer-Lambert. *Para no olvidar.*

1.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo primordial de este libro es tratar de difundir el conocimiento básico de las técnicas y tecnologías usadas por aquellos instrumentos de medida denominados, en general, analizadores de proceso en línea. Instrumentos que miden una determinada característica de un fluido que forma parte, como producto final, elemento intermedio o materia prima de un proceso de fabricación.

En este capítulo se esboza la historia de los modernos analizadores, con algunos de sus hitos más significativos y se describen las distintas clases o grupos de estos instrumentos. También se recuerdan los conceptos y parámetros que permiten evaluar la calidad de las medidas analíticas.

1.2. INSTRUMENTOS DE MEDIDA Y CONTROL

En todos los procesos de producción, tanto continuos como por lotes, donde se manejan fluidos, es necesario controlar algunas variables de estado. Tradicionalmente, las más habituales de estas variables son: presión, temperatura, caudal y nivel.

Por ejemplo, en una caldera de vapor se debe mantener aproximadamente constante el nivel de agua en el calderín, que tiende a variar cuando varía el caudal de vapor generado y/o el caudal de agua de alimentación. Se debe controlar el caudal de combustible en función del caudal de vapor generado y de la composición del combustible; mejor dicho, de su poder calorífico. El caudal de aire de combustión se debe ajustar en función del caudal de combustible para mantener la eficiencia de la combustión, etc. etc.

Si volvemos al nivel de calderín, se debe medir y, además, tomar acciones para mantenerlo constante.

Como varía en función de los caudales de vapor generado y de agua de alimentación hay que medir ambos. Las tres medidas se comparan en lo que se denomina un control a tres elementos que genera una señal correctora que abre o cierra la válvula de alimentación de agua, elemento final de este lazo de control (Figura 1.1).

Sirva este ejemplo elemental para ilustrar cómo un proceso necesita ser controlado para que funcione de forma estable.

Pero para poder controlar lo primero es medir. Los instrumentos de medida, en contacto íntimo con el proceso deben estar contruidos de forma que puedan soportar las condiciones de este: presiones, altas temperaturas, etc. Básicamente estos instrumentos se pueden agrupar en dos grandes grupos: los indicadores locales y los transmisores. Las señales generadas por estos últimos se usan como entradas al sistema de control. Es la información que se tiene del estado del proceso.

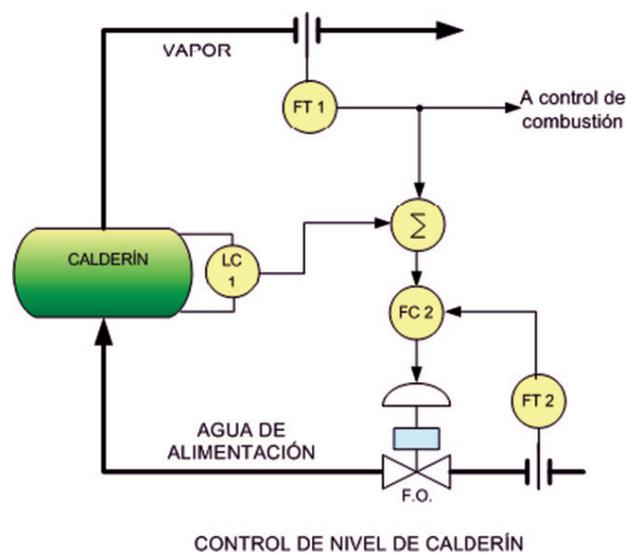


Figura 1.1. Instrumentos de control.

En su forma elemental un lazo de control se compone de un transmisor, un controlador y una válvula o elemento final de control. En las grandes plantas industriales los elementos de medida están montados cerca o sobre el propio proceso –tuberías, tanques, etc.– y los instrumentos controladores se integran mediante un Sistema de Control, que suele estar centralizado en la Sala de Control de la Planta.

Basándose en esta información de estados: presiones, temperaturas, caudales y niveles, se ha desarrollado históricamente el control de los procesos industriales. Primero con instrumentos mecánicos muy rudimentarios. Después con instrumentos de transmisión y accionamiento neumático, más tarde con instrumentos electrónicos. Ahora con buses de campo, electrónica digital y microprocesadores por doquier.

Sin embargo, las bases de medida de la presión, del caudal, del nivel o la temperatura apenas han variado desde los instrumentos neumáticos hasta ahora. Y, por otro lado, no hay que olvidar que las válvulas de control, generalmente el último elemento del lazo, siguen siendo mayoritariamente de accionamiento neumático. El gran salto lo han dado los sistemas de control que, con la incorporación de técnicas digitales, ordenadores y aplicaciones informáticas, permiten la realización de estrategias de control impensables con los antiguos instrumentos analógicos.

Si nos detenemos en el sistema de control de combustión de una caldera (Figura 1.2), observamos que se

deben medir caudales de aire y combustible, que varían en función de la carga o producción de la caldera, con elementos selectores y relés de relación que permitan tener siempre un exceso prefijado de aire. Aquí ya se pueden ver algunas aplicaciones elementales del uso de instrumentos analíticos. Midiendo el poder calorífico del combustible se pueden tomar acciones adelantadas de control y midiendo el contenido de oxígeno en los gases de la chimenea se puede ajustar con mayor precisión, y de forma dinámica, el caudal de aire.

Los analizadores optimizan las acciones de control y, en algunos casos, permiten el desarrollo de estrategias de control avanzado para mejorar el rendimiento y la seguridad de las plantas de proceso.

Además, debido al desarrollo de estas estrategias se ha puesto de manifiesto que para ciertas aplicaciones no es suficiente con las cuatro variables de estado clásicas. Hace falta más información. Es necesario conocer más datos del propio proceso, además de su presión o temperatura. Hay que conocer su composición o alguna de sus propiedades específicas. Y se comienzan a considerar medidas como la de la viscosidad, composición, presión de vapor, puntos de destilación, contenido de agua, etc.

Y se empieza a usar como importante la medida de algunos instrumentos auxiliares que antes se utilizaban como referencia y registro. Y se discute si no sería conveniente conocer en tiempo real datos que usualmente se obtenían de análisis de laboratorio; en muchos casos un análisis cada 8 horas.

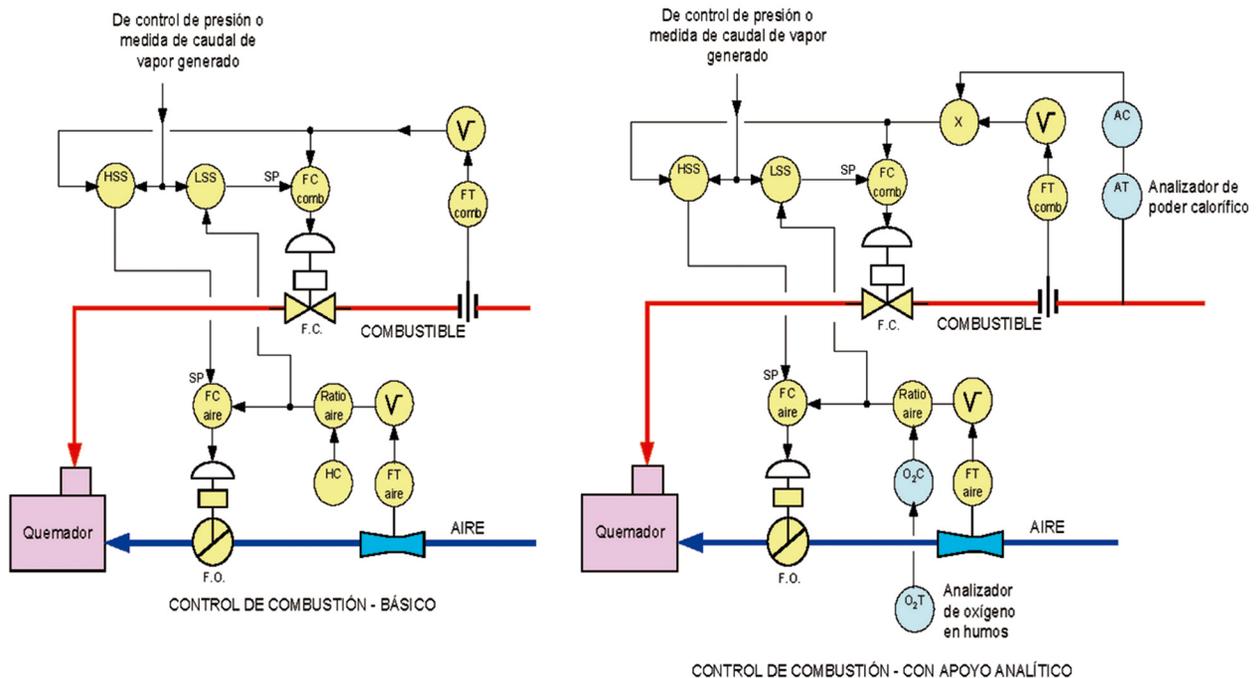


Figura 1.2. Control básico de combustión – Sin y con ayuda de analizadores.

Se comienzan a valorar los analizadores de proceso, por algunos denominados, con mucha razón, instrumentos de medida de calidad.

Pero el desarrollo de las técnicas analíticas no ha sido solo originado por las necesidades de control de proceso. También se requieren analizadores para cumplir con regulaciones de la Administración, sobre todo en materia de control de contaminación tanto atmosférica como de aguas; también como elementos de protección personal: análisis del ambiente para determinar concentraciones peligrosas de gases tóxicos o deficiencia de oxígeno en el aire.

En general una cosa ha llevado a la otra: posibilidad de medir algo y necesidad de medir algo. Ahora popularmente parece que todo es analizable: desde la composición de rocas del planeta Marte hasta el contenido de oxígeno en algas situadas en las profundidades marinas; desde la concentración de azúcar en la sangre del diabético hasta el contenido de alcohol en el aliento del trasnochador.

1.3. UN POCO DE HISTORIA

Históricamente se considera que los modernos instrumentos analíticos de proceso se empezaron a desarrollar, en los años 30 del siglo pasado. En los laboratorios de investigación de la I. G. Farbenindustrie (actual BASF) en Ludwigshafen, Alemania, los doctores K. F. Luft y E. Lehrer (Figura 1.3), desarrollaron el registrador de absorción infrarroja y el registrador de oxígeno magnético, respectivamente. Estos instrumentos nacieron en el taller de instrumentación de la planta I. G. en Oppau. Ochenta años más tarde, la absorción infrarroja no dispersiva, con el detector acústico Luft, y la medida de oxígeno basada en la susceptibilidad magnética se siguen usando ampliamente en aplicaciones industriales.



Figura 1.3. Precursores. Erwin Leher (izquierda), Karl Luft (derecha). (Gentileza de ABB).

Aunque el desarrollo de las técnicas instrumentales para análisis químicos cualitativos y cuantitativos comenzó a principios del siglo 20, esta actividad se confinaba en laboratorios científicos de investigación. Los primeros instrumentos analíticos fueron construidos por los propios investigadores. La industria de los primeros instrumentos analíticos de tipo comercial empezó a tomar forma a lo largo de los años 30. El Dr. Arnold O. Beckman desarrolló el primer analizador de pH en 1934 (patente solicitada el 12 de octubre de 1934 y concedida el 27 de octubre de 1936) y fundó la empresa Beckman Instruments para su comercialización.

En el año 1879, Eugen Hartmann funda el “Optical Institute”. Wunibald Braun se le une en 1882. La empresa es establecida en Frankfurt Main en 1884. Desde 1901, “Hartmann & Braun” cotiza en bolsa y se especializa en el diseño y construcción de instrumentos de medida de variables eléctricas, de presión y temperatura. En 1919 presenta al mercado un analizador de CO₂ para control de combustión.

Después de la segunda guerra mundial (1946) un equipo de inteligencia del ejército inglés interrogó al personal de 23 plantas químicas y 18 firmas de fabricación de instrumentos a fin de estudiar el desarrollo y aplicación de instrumentos industriales en la industria química alemana. Este equipo determinó que durante la guerra, se estuvieron usando cientos de registradores de infrarrojos y algunos registradores de oxígeno, lo que suponía un gran avance. Además de sus investigaciones, este equipo confiscó y “evacuó” a Gran Bretaña varios de estos analizadores.

En aquel tiempo, Hartmann & Braun era la empresa licenciataria por I. G. para la construcción de registrador por absorción infrarroja (URAS: Ultrarotabsortion Schreiber). Esta casa también construía otros tipos de instrumentos, entre ellos el CALDOS (Figura 1.4) (Analizador de gases por diferencia de conductividad térmica) y el MAGNOS (Analizador de oxígeno por susceptibilidad magnética).

A lo largo de los años 40 se comienzan a instalar analizadores en las refinerías y plantas químicas de EE UU. Inicialmente analizadores de infrarrojos con detector Luft así como con filtros de interferencia, analizadores de oxígeno para control de combustión, analizadores de conductividad térmica diferencial para gases de hidrocarburos y destiladores para corrientes de proceso en refinerías.

En los años 50, los cromatógrafos de gas se convirtieron en la tecnología preferida en la industria petroquímica. Las plantas de Union Carbide en South Charleston, West Virginia y Phillips Petroleum en

Bartlesville, Oklahoma, fueron líderes en el desarrollo de aplicaciones en línea para cromatógrafos. Estas aplicaciones de cromatografía en línea tuvieron un gran crecimiento y se convirtieron en la clase más importante de instrumentación analítica de proceso durante los años 60.



Figura 1.4. CALDOS. Analizador de conductividad térmica. 1935. (Gentileza de ABB).

También en los años 50, la empresa DuPont desarrolló una aplicación analítica en línea por fotometría ultravioleta en el contexto de la producción de pigmento de dióxido de titanio. DuPont organizó una unidad de negocio independiente para explotar comercialmente esta tecnología (UV de proceso) hasta que, 30 años más tarde, esta unidad de negocio se convirtió en Ametek. Al mismo tiempo, DuPont mejoró su fotómetro UV con la tecnología de matrices de fotodiodos a fin de incorporar al instrumento la capacidad de análisis de multicomponentes.

A inicio de la segunda mitad del siglo, Kauko Einari Hallikainen (Hal), ingeniero norteamericano (Chicago, 1916-California, 2001) de origen finlandés, trabajando para Shell Development Company en Emerville, California y posteriormente (desde Enero de 1952 hasta Agosto de 1975) en sus propias compañías: Hallikainen Instruments y Hallikainen Associates, diseñó diversos analizadores para la medida de propiedades físicas. Instrumentos cuyos principios físicos siguen usándose hoy día. Entre ellos, el viscosímetro de capilar, el destilador continuo de un punto, analizadores de presión de vapor por tobera, punto de vertido por

detección de giro de bola o el monitor de alarma de color (Figura 1.5).

Durante los años 60, la tecnología de analizadores de proceso ya se estaba aplicando ampliamente en las grandes refinerías de petróleo y plantas petroquímicas. Pero, excepto para aplicaciones de control de combustión, fuera de estas industrias los analizadores de proceso en línea prácticamente no se usaban.

Estos analizadores “pioneros” básicamente eran: cromatógrafos, colorímetros, densímetros, destiladores de punto final y punto inicial, Flash Point, H₂S por cinta de acetato, infrarrojos, humedad, refractómetros, presión de vapor, viscosímetros y fotómetros UV.

Cuando a finales de los 60 se produjo el uso intensivo de los ordenadores de proceso, y en los años 70-80 de los sistemas de control digitales, con el desarrollo de estrategias de control avanzado en refinerías de petróleo y plantas petroquímicas, se aceleró la aplicación de los analizadores en línea que se convirtieron en esenciales para tales estrategias. A su vez, estos analizadores se beneficiaron en gran medida de los nuevos computadores y microordenadores emergentes.



Figura 1.5. Destilador años 70. (Foto de A. Adsua).

El primer espectrómetro de masas en línea se instaló en una planta de óxido de etileno de Dow Chemical en Freeport, Texas, en 1975. Otras técnicas para análisis de multicomponentes incluyendo infrarrojos por transformadas de Fourier (FTIR) y diversos métodos de espectroscopia de gran desarrollo experimental han sufrido grandes avances en estos años.

El rango de aplicaciones analíticas usadas en aplicaciones de proceso en línea continúa expandiéndose.

Tecnologías tales como cromatografía iónica, cromatografía de fluidos supercríticos, espectroscopia TDLAS, RMN, etc., se están desarrollando en la actualidad.



Figura 1.6. Analizador de SO₂ Serenius. (Gentileza de Eco-tech).

En España, durante el boom industrial de los años 60-70 del siglo pasado se montaron muchas plantas industriales de origen alemán o norteamericano que incorporaban estas técnicas analíticas en sus procesos. A mediados de los años 70 se comenzaron a instalar nuevos sistemas de control digital que permitían el desarrollo de estrategias avanzadas de control y que necesitaban señales fiables de analizadores de proceso. Cuando se construyó el complejo petroquímico de Repsol en Tarragona (mediados de los 70) ya se instalaron agrupaciones de equipos analíticos en sus procesos originales. El proyecto de diseño de estos equipos fue una actividad independiente del resto de ingeniería de instrumentación. Las vetustas casetas de analizadores, construidas de hormigón, en las zonas fría y caliente de las Plantas de Etileno, dan fe de ello. Estaban equipadas con cromatógrafos Bendix de programador separado, que, años más tarde (en los 90) fueron remplazados por modernos cromatógrafos de la misma casa Bendix, antes Greenbier Instruments, que pasó a ser Combustión Engineer y, más recientemente, ABB.

En la refinería de Petromed en Castellón (ahora B.P. Oil) y en el periodo 1987-1989 se desmontaron muchos de los analizadores originales de la construcción de la refinería y se instalaron los primeros sistemas que incorporaban técnicas de elaboración de Dato Válido y mando remoto de Validación y que en conjunción con nuevos sistemas digitales de control permitieron elaborar técnicas de control avanzado. Sistemas de analizadores que, enseguida, se hicieron extensivos a las demás refinerías nacionales.

1.4. CLASES DE ANALIZADORES

Para la organización de los distintos capítulos de este libro, hemos adoptado el criterio de ordenación siguiente:

- Analizadores de técnicas generales: aquellos instrumentos que usan una técnica determinada y que mediante una programación y configuración específica permiten el análisis de una o varias determinadas sustancias. Por ejemplo analizadores basados en cromatografía, absorción de infrarrojos, etc.
- Analizadores de propiedades físicas.
- Aplicaciones específicas. Analizadores diseñados para la medida de una determinada calidad o componente. Como sal en crudo o humedad en general.
- Análisis de gases.
- Analizadores usados en el control de la calidad del aire.
- Analizadores usados en el control de calidad de aguas.

Pero, por otro lado, en la práctica diaria se suelen definir ciertos tipos de analizadores en base, en cierta medida, a su aplicación o características esenciales. Es fácil comprobar que muchos analizadores caen, al mismo tiempo, dentro de varios de estos tipos y que, en el fondo, sus definiciones son totalmente arbitrarias y que suelen formar parte del argot profesional.

Veamos algunas de estas clases de analizadores.



Figura 1.7. Analizador GC de poder calorífico Total Flow. (Gentileza de ABB).

1.4.1. IN SITU O EXTRACTIVOS

La primera gran clasificación de los analizadores de proceso se basa en su emplazamiento en relación con el proceso: es decir analizadores montados y midiendo directamente sobre el proceso: analizadores *in situ*; y analizadores montados fuera de este y que analizan una

muestra que es extraída de la corriente de proceso, los denominados extractivos.

En líneas generales, y desde el punto de vista de un ingeniero de analizadores, los montados *in situ* presentan, de entrada, una serie de desventajas en relación con los extractivos. Cuando la aplicación lo permite suele ser más aconsejable instalar un analizador extractivo, a pesar de los inconvenientes de un sistema de transporte y acondicionamiento de muestras, ya que los instalados *in situ* son más complicados de calibrar y están sujetos directamente a la potencial acción nociva directa del proceso: temperaturas, presiones, componentes corrosivos, etc. Sin embargo hay algunas aplicaciones que exigen analizadores instalados directamente sobre el proceso, con analizadores capacitados para trabajar *in situ* a pesar de los inconvenientes anteriores.

1.4.2. PARA LÍQUIDOS O PARA GASES

Ambos, *in situ* o extractivos, se usan en la industria de proceso para determinar calidades o composiciones de fluidos. Dejando a un lado ciertos analizadores especiales usados para áridos o aplicaciones exóticas, en aplicaciones de proceso se analizan corrientes líquidas o de gases. El tipo de muestra o medio a medir determina esta clasificación. Así, dos analizadores determinados pueden estar basados en el mismo principio analítico, pero dependiendo de su uso, su construcción puede llegar a ser muy diferente.

1.4.3. PROPIEDADES FÍSICAS

Se denominan como de propiedades físicas aquellos analizadores usados en la industria para medir un cierto valor de una determinada propiedad física. Dentro de este grupo, y algunos de ellos clásicos en la industria de refino del petróleo, podemos citar analizadores para medir viscosidad, densidad, punto de destilación, punto de congelación o cristalización (Freezing Point), punto de niebla (Cloud Point), punto de obstrucción de filtro frío (POFF o CFPP), presión de vapor (RVP), punto de vertido (Pour Point), poder calorífico, índice de octano, punto de inflamación o destello (Flash Point), color, índice de refracción, etc.

Los analizadores de propiedades físicas, a su vez, se pueden dividir en dos grandes grupos: los que correlacionan con métodos de laboratorio ASTM o similar (denominados popularmente como analizadores ASTM) y los que no correlacionan con ningún método de laboratorio determinado.

Los no ASTM miden directamente una propiedad física de la corriente de muestra. Densímetros y viscosímetros son ejemplos de este tipo de analizadores.

Típicamente no requieren ningún tipo de correlación con métodos o técnicas de laboratorio, por lo que no hace falta desarrollar un modelo en base a un elevado número de muestras de valor conocido para que su medida sea aceptada como válida. Los analizadores tipo ASTM requieren, por definición, una correlación con un determinado método de análisis en laboratorio.

CLASES DE ANALIZADORES

● De propiedades físicas – Líquidos-



- Índice de refracción
- Presión de vapor
- Índice de octano
- Freezing Point
- POFF – CFPP
- Colorímetros
- Calorímetros
- Cloud Point
- Flash point
- Destilación
- Viscosidad
- Pour Point
- Densidad

Figura 1.8. Analizadores de propiedades físicas.

Hablando en términos generales, muy pocos métodos de laboratorio se pueden automatizar en un analizador de proceso. A menudo se aplica una técnica de medida completamente diferente a la empleada por el método de laboratorio, pero se espera que sus resultados analíticos se correspondan con los datos de dicho método de laboratorio, lo que hace preciso que se desarrolle una forma de correlación entre ambos equipos o métodos, que generalmente realiza el fabricante del analizador de proceso o, en algunos casos, el propio usuario.

Los fabricantes han desarrollado diferentes y variadas técnicas para cada tipo de analizador de medida de propiedades físicas. Por ejemplo, las técnicas para la medida de la densidad incluyen la medida de los cambios en la frecuencia de resonancia de un tubo que vibra como función de la densidad de la muestra de proceso que pasa por el tubo. Otras técnicas incluyen la absorción de rayos X procedentes de una fuente radiactiva o la medida de la deformación de un tubo curvado por el que se hace pasar la muestra y se somete a vibración para que se produzca la aceleración de Coriolis.

En un inciso, conviene resaltar que algunos analizadores emplean combinaciones de técnicas para medir una determinada propiedad de la muestra. Por ejemplo, una medida del contenido total de azufre se puede obtener por medio de la combustión de la muestra a muy alta temperatura, de forma que todas las especies de azufre se transformen en SO_2 , que se puede medir de

formas diferentes. Una de ellas involucra la reacción con ozono y la medida de la fluorescencia o luz emitida a una determinada longitud de onda cuando las moléculas se desexcitan.

1.4.4. CONTINUOS O CÍCLICOS

Otra forma de definirlos es por su modo de funcionamiento. Los cíclicos realizan una secuencia determinada de análisis, al final de la cual proporcionan o refrescan el resultado de la medida analítica. Los continuos están continuamente midiendo y dando continuamente una señal de salida función de la medida analítica en tiempo real.

1.4.5. COMPOSICIÓN

Así se denominan aquellos instrumentos usados para medir la concentración de uno o varios determinados componentes dentro de una mezcla. Pueden ser de líquidos o de gases. Instrumentos tales como cromatógrafos, fotómetros NDIR o FTIR o espectrómetros pertenecen a esta clase. Hacemos notar que algunos de estos tipos se denominan coloquialmente según el componente analizado y no por la técnica analítica utilizada. Así cuando hablamos de analizadores de oxígeno, de azufre, de SO₂, etc., estamos refiriéndonos a analizadores que miden el contenido

de oxígeno, o de azufre, o de SO₂, en una muestra determinada, independientemente de la técnica usada.

1.6. CALIDAD DE AIRE-EMISIONES-INMISIONES

La protección del medio ambiente ha llevado a las distintas administraciones a tomar acciones y legislar normas orientadas a mantener y mejorar la calidad de este. Como parte de esta protección se han dictado leyes que limitan las emisiones de gases o partículas contaminantes a la atmósfera y, por otro lado las concentraciones de algunos compuestos nocivos en el aire ambiente.

La industria ha desarrollado una serie de analizadores de uso en esta clase de aplicaciones, algunos de ellos específicos, otros de uso general y que sirven para este servicio. En ambos casos deben cumplir unas exigentes normas de garantía de calidad.

Emisiones

Para garantizar las cantidades máximas de contaminantes que se vierten, se exige a la industria que mida las concentraciones de ciertos compuestos en los gases de combustión de calderas y generadores y, muy especialmente, en los humos de incineradoras, tanto industriales como municipales.



Figura 1.9. Organismos reguladores.

Se exige que, prácticamente, en cada chimenea o conducto de gases a la atmósfera se instale un sistema de medida de estos componentes, sistema que se denomina SMCE o CEMS (Sistema de Monitorización Continua de Emisiones). Los componentes que se suelen medir, y sus rangos de medida, en cada SMCE dependen del tipo de industria y vienen requeridos por la administración. En general, para procesos de combustión suelen ser SO_2 , NO_x , CO y partículas. Además a efectos de normalización se mide el contenido de O_2 , el caudal, presión y temperatura de gases. En los humos de incineradoras, además de los citados se suelen analizar las concentraciones de carbonos totales, HCl , HF , vapor de agua y, dependiendo de la instalación, diversos metales, como mercurio, cadmio, arsénico, plomo, etc.

El diseño de los SMCE, las especificaciones de sus instrumentos, métodos de cálculo para verificación de la calidad de las medidas, emplazamiento de sondas, montaje de los equipos, calibración y normalización de medidas, almacenamiento de datos y control de la calidad de las medidas están regulados por normas oficiales.

Existe una amplia documentación de directivas, decretos, normas e instrucciones relacionadas con el control de emisiones a la atmósfera y las concentraciones permitidas de contaminantes en el aire. También de normas e instrucciones de cómo limitar las emisiones y de cómo deben ser construidos, instalados, probados y mantenidos los sistemas automáticos de medida.

En Europa, esta documentación, que está siendo continuamente revisada, generalmente se origina en el Consejo de Europa, se convierte en normas nacionales o reales decretos y, además, hace desarrollar normas, especificaciones e instrucciones de las diversas comunidades autónomas.

Es importante mencionar que cada SMCE debe tener previstos los medios para poder ser contrastado con equipos de medida manuales. Los que se denominan como medidas de referencia.

Especialmente esencial en los SMCE es el control de calidad requerido, Todo ello según los requisitos de unas ciertas normas, que en nuestro ámbito se concretan en la UNE-EN 14181:2005 y también en la UNE-EN ISO 14956:2003. En el capítulo correspondiente a Calidad de Aire se profundiza en estos temas.

Inmisiones

La legislación también determina la concentración máxima de ciertos compuestos nocivos en el aire ambiente y que deben ser medidos de forma puntual o continua. Estos analizadores podrían ser del mismo tipo que los de control de emisiones, con la única diferencia de

sus rangos de medida, que deben ser muy bajos. Este hecho ha llevado al desarrollo de algunas técnicas analíticas distintas a las usadas en SMCE. Por ejemplo, el análisis de SO_2 en emisiones se puede realizar con técnicas espectrofotométricas en la región UV, mientras que en inmisiones se debe utilizar la fluorescencia UV pulsante. El NO , en emisiones puede ser analizado también por NDIR, mientras que en inmisiones se deben utilizar analizadores basados en quimioluminiscencia.

Como ejemplo de rangos de medida, en el caso del NO , para medidas de emisiones los valores de concentración pueden ir desde 400 mg/Nm^3 hasta un mínimo de 50 mg/Nm^3 (NO_x expresado como NO_2) para turbinas de gas natural en funcionamiento unitario, valores medidos en presencia de un 15% de oxígeno.

La directiva 2000/76/EC indica como valores límite para la emisión de NO_x un valor máximo de 200 mg/Nm^3 y un mínimo de 30 mg/Nm^3 (durante 30 minutos) con valor tope para NO_2 : 20 mg/Nm^3 .

Para inmisiones los valores límite son del orden de $50 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ (percentil 50) hasta $200 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ (percentil 98).

Expresado de otra forma, los límites están situados en:

Emisiones:

400 mg/Nm^3 a $50 \text{ mg/Nm}^3 = 195 \text{ ppm}$ a $24,4 \text{ ppm}$.

200 mg/Nm^3 a 30 mg/Nm^3 ó $20 \text{ mg/Nm}^3 = 97,5 \text{ ppm}$ a $14,6 \text{ ppm}$ ó $9,75 \text{ ppm}$, medible por NDIR.

Inmisiones:

$50 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ a $200 \text{ } \mu\text{g/m}^3 = 0,02 \text{ ppm}$ a $0,09 \text{ ppm}$ (ó $20\text{-}90 \text{ ppb}$), medible por quimioluminiscencia.

1.4.7. CALIDAD DEL AGUA

Otra línea importante de analizadores es la relativa a la medición de ciertas características físicas del agua, como el pH, la turbidez, la conductividad o la concentración de ciertos compuestos disueltos, como cloro, carbono orgánico, etc.

Los analizadores de calidad de agua se podrían dividir a su vez en analizadores de aguas de procesos industriales, como los usados en las plantas generadoras de energía –ciclo agua vapor– y en analizadores empleados en medir características de las aguas corrientes o públicas, superficiales o profundas: ríos, lagos, etc., como medios de determinar contaminantes y proteger el medio ambiente.

1.4.8. QUÍMICA HÚMEDA

Otra clase de analizadores son los denominados de química húmeda, coloquialmente conocidos como de

“química en un pote”. En general son aquellos analizadores que realizan, de forma automatizada, una secuencia o método de análisis derivado de un procedimiento de laboratorio. En general suelen necesitar reactivos y/o fluidos auxiliares. Como ejemplo típico, algunos analizadores de calidad del agua (Figura 1.10) o, específicamente, los tituladores.



Figura 1.10. Química húmeda. Cloro libre en agua. Capital Controls® CL 500. (Cortesía de Severn. Trent Services).

1.4.9. POR LA APLICACIÓN Y USO

Otra forma de clasificar, empleada por algunas compañías para su uso interno, se basa en la aplicación de cada analizador o el uso que se da a la medida analítica. De esta forma, los analizadores se pueden emplear en:

- Control de procesos.
- Control de calidad.
- Identificación positiva.
- Medio ambiente.
- Seguridad.

Cuando el analizador se usa en control de procesos significa que forma parte de un determinado lazo de control en alguno de los niveles que veremos más adelante.

Se denomina una aplicación como de calidad, también definida como control supervisorio, cuando se mide una determinada variable analítica que determina el buen funcionamiento de un proceso y que el producto que se está obteniendo se encuentra dentro de especificaciones. Es una aplicación muy típica. Generalmente el resultado del análisis se toma como indicativo de la buena (o mala) marcha del proceso, pero su señal de salida no se suele incorporar a ningún lazo de control.

Identificación positiva. Aplicación cuando se recibe un producto o materia prima y se tiene que depositar en un tanque o recipiente. Se mide una determinada característica para identificar que es el producto correcto.

Los analizadores de medio ambiente (calidad del aire o del agua) son los dedicados a medir ciertas concentraciones de contaminantes en el aire o aguas públicas o ciertas condiciones físicas de estas. Generalmente deben cumplir los requisitos establecidos por la normativa legal vigente en cada caso.

Los analizadores dedicados a seguridad se pueden referir a dos tipos: los que miden ciertas concentraciones de productos en el aire como protección de la seguridad personal o de las instalaciones y los que se usan en ciertos procesos para medir valores analíticos que si se sobrepasan resultan peligrosos. Por ejemplo, en un reactor de óxido de etileno, donde se mezcla oxígeno y etileno. Si se sobrepasa una determinada relación etileno-oxígeno la mezcla genera una reacción exotérmica violenta, es decir, una explosión muy potente.

1.5. EL PAPEL DE LOS ANALIZADORES EN SISTEMAS DE CONTROL DE PROCESOS

La instalación con éxito de los primeros analizadores de proceso ocasionó un enorme interés en el uso de estos instrumentos analíticos en sistemas de control de procesos industriales.

Durante mucho tiempo la fiabilidad de los analizadores, desafortunadamente, dejaba mucho que desear; la confianza en los resultados analíticos era, de forma comprensible, muy baja y, además, había muy poca experiencia de aplicaciones tanto en los fabricantes de los analizadores como en los usuarios. El resultado final era que, si se instalaban analizadores, prácticamente se usaban en plan experimental. O solo como indicadores que permitían al operador ajustar el proceso, manipulando otras variables basándose en las medidas analíticas. Este procedimiento se denomina corrientemente como control de “lazo abierto”. Había algunas aplicaciones de control en “lazo cerrado”, pero eran consideradas como excepciones, y siempre con los medios instrumentales que permitían la posibilidad imprescindible de pasar a manual o lazo abierto.

Pero después de años de experiencia y mejoras en la tecnología de los analizadores, y mucha más en el control de procesos, la situación es completamente diferente debido a los enormes progresos en la tecnología de la medida, en los materiales de diseño y, sobre todo, por la introducción de los microprocesadores y ordenadores, tanto en el campo de los instrumentos analíticos como en el de los sistemas de control. Es-

tos sistemas de control e instrumentos digitales han propiciado la disponibilidad de técnicas avanzadas de control sofisticadas y altamente eficientes, permitiendo controles más precisos y la optimización de las operaciones de planta. En muchos casos, estas técnicas, para poder funcionar correctamente, deben tener acceso, en tiempo real, a datos de la calidad de las corrientes de proceso, datos suministrados por analizadores.

El papel de los analizadores en los sistemas de control de proceso es, por lo tanto, muy importante. La principal justificación para instalar analizadores de proceso es su mayor contribución a la eficiencia y efectividad de los sistemas de control que aumentan el rendimiento de las plantas. Actualmente existen cientos de aplicaciones de control avanzado aplicadas a todo tipo de industrias y que se basan en medidas analíticas.

La mejor forma de ilustrar los requerimientos básicos de los analizadores que se usan en sistemas de control de procesos es comentar la jerarquía del control de procesos; esto es, los distintos niveles a los que un analizador se puede integrar en el sistema de control.

1.5.1. NIVELES DE CONTROL

Primero, debemos identificar las diferencias entre los dos modos de control: manual y automático, familiares a cualquier ingeniero de instrumentación. En control manual, el operador de la planta es el responsable de ejercer el control, cuya calidad dependerá de la capacitación, experiencia, habilidad, y hasta del estado de ánimo, del citado operador. Obviamente, esta es una solución simple del problema de control, pero inaceptable desde el punto de vista de la eficiencia. El control automático, por el contrario, es más complejo (se necesita más instrumentación) pero proporciona una mayor calidad y más consistente al control y, claro, será la solución preferida.

En la actualidad, con ordenadores y sistemas digitales de control se consideran, básicamente, tres niveles de control, cada uno de los cuales tiene sus requerimientos específicos para los analizadores de proceso:

Regulación (Nivel I)

Es el nivel en el que se desarrolla un control básico y directo del proceso. La instrumentación incluye los elementos necesarios para realizar esta función (por ejemplo: sensores, transmisores, controladores, válvulas de control, etc.) en lo que se puede denominar como una lazo de control simple. Si se usan analizadores, como elementos primarios, a este nivel de regulación deben cumplir con ciertos requisitos. Los dos más importantes son:

- Respuesta rápida.
- Fiabilidad y factor de servicio muy altos.

Las aplicaciones de analizadores a este Nivel I de control son un poco delicadas, debido a que un fallo del analizador se refleja directamente sobre el elemento final de control. Solo algunos tipos de analizadores (por ejemplo, conductividad, densidad), que son de funcionamiento continuo, con un factor alto de servicio y fiabilidad demostrada, se pueden usar. La mayoría de analizadores, excepto aquellos que son capaces de ser instalados *in situ*, directamente sobre la línea de proceso, tienen tiempos de respuesta que los hacen demasiado lentos para control en este Nivel I.



Figura 1.11. Cromatógrafo PGC. (Cortesía de ABB).

Control supervisorio (Nivel II)

El control supervisorio de un proceso industrial normalmente se realiza por medio de un sistema de control de proceso, generalmente con un sistema de instrumentación digital. La señal del analizador se suele usar como punto de consigna del controlador principal. Aquí las reglas son algo diferentes:

- Es aceptable un tiempo de respuesta más lento.
- Es aceptable un factor de servicio más bajo.

Esto es debido a que en el caso de un fallo del analizador, la regulación básica del sistema de control puede continuar realizando su función. De todas formas, no hay que olvidar que aunque sea aceptable un factor

de servicio más bajo en este Nivel II, no hay ninguna razón para alterar la filosofía básica de mantener el factor de servicio del analizador tan alto como sea práctico y razonablemente posible.

Muchos analizadores de proceso se aplican a este nivel de control.

Control de optimización (Nivel III)

La optimización de un proceso se lleva a cabo en el sistema de control de proceso o a un nivel más elevado, dado que en los cálculos y algoritmos de optimización entran ciertos factores económicos, tales como rentabilidad, oferta y demanda, stocks, costes de materias primas, etc.

A este nivel de control, el tiempo de respuesta puede ser bastante lento, de forma que hay un gran campo de aplicaciones de los analizadores de proceso. Y la realidad es que este tipo de aplicaciones se han incrementado rápidamente en este tipo de control.

Un aspecto interesante producido por la optimización de procesos es la necesidad de conocer la evolución del proceso, es decir: es más importante la repetibilidad de la medida que su exactitud. En regulación, lo interesante es mantener el proceso en condiciones estables; la única referencia a valores absolutos de medida se produce en el balance de materiales de la planta y en operaciones de compra-venta de productos (custody transfer).

Con el control de optimización lo interesante es poder mover el proceso, por decirlo de alguna forma, para producir una distinta pureza o composición del producto, basándose en la coyuntura económica del momento. Es muy importante conocer el punto de partida, adónde se quiere llegar y el momento en que se ha alcanzado ese punto. Por ello, el concepto de exactitud, y por consiguiente de calibración, cada día es más importante.

1.5.2. ALGUNOS CRITERIOS EN CONTROL USANDO ANALIZADORES

De lo anterior, se puede decir que hay dos factores primordiales que se deben considerar cuando se usen analizadores en control de procesos:

- Tiempo de respuesta del sistema.
- Fiabilidad y factor de servicio del sistema analítico.

El tiempo de respuesta depende también y en gran medida del sistema de muestra. En general y típicamen-

te, los sistemas de acondicionamiento y transporte se deben diseñar con un tiempo de respuesta máximo de 90 segundos (60 segundos en el transporte y 30 segundos en el resto del sistema de acondicionamiento). Estos son valores típicos para análisis de líquidos, pero a veces la dinámica del proceso puede requerir un tiempo de respuesta inferior a estos 90 segundos; esto lo debe decidir el ingeniero de control de procesos y lo debe tratar de conseguir el ingeniero de sistemas de analizadores.

El tiempo de respuesta de sistemas con analizadores cíclicos es la suma del tiempo de ciclo y del tiempo de respuesta del sistema de muestra.

En los cromatógrafos de gas, típicos analizadores discontinuos, es común encontrar tiempos de ciclo de 4 a 5 minutos; los extremos son ciclos rápidos de 60 segundos o menos y ciclos más largos, del orden de 8 a 15 minutos. Cuando se usa un sistema de control para control supervisorio con un sistema de adquisición de datos, es ineficiente e injustificado tener ajustado el sistema para tomar datos y ejecutar acciones de control avanzado cada 5 segundos cuando los nuevos datos analíticos son solo disponibles, digamos, cada 5 minutos. Lo normal, sería ajustar la adquisición de datos para que se reciban solo cuando se tengan nuevos o mantener congelada la señal del analizador hasta que el dato se refresca y entonces hacer que el analizador envíe una señal al sistema de control indicando que hay disponible un nuevo dato (la señal tradicional “fin de ciclo”, “read-now” o “come-read”).

La fiabilidad y el factor de servicio (términos del mantenimiento industrial) de un analizador y su disponibilidad para control de proceso vienen determinados por la calidad del propio analizador (su precisión), el diseño del sistema, su instalación y la calidad de su mantenimiento, así como del método y frecuencia de su calibración.

1.6. PARÁMETROS ESENCIALES DE UN ANALIZADOR

Para cualquier tipo de analizador hay una serie de parámetros que permiten determinar la calidad de sus medidas.

Estos parámetros son:

- Exactitud.
- Precisión o repetibilidad.
- Reproducibilidad.
- Sensibilidad.
- Linealidad.
- Ruido.
- Tiempo de respuesta.

- Tiempo de ciclo.
- Deriva de cero.
- Deriva de span.

Una de las formas más usuales de comprobar la calidad de los resultados de un analizador es compararlos con los resultados del mismo análisis en ensayos de laboratorio.

Algunos analizadores, especialmente los de propiedades físicas, deben cumplir especificaciones que se refieren a su correlación con los resultados que se obtienen en los correspondientes ensayos de laboratorio.

1.6.1. EXACTITUD

La exactitud global es la medida de la aptitud del analizador para coincidir con un valor dado u objetivo obtenido como referencia usando un método analítico alternativo. Modernamente se está sustituyendo el término “exactitud” por el de “acuerdo o grado de acuerdo”¹.

Se podría entender como la capacidad del analizador para acercar su medida al valor REAL, absoluto, teórico y sin error de variable medida.

Cualquier señal de medida, sea de un analizador como de cualquier instrumento convencional de medida de presión, caudal, etc., está sujeta a un número de errores usualmente clasificados en tres tipos: aleatorios, sistemáticos y graves.

Los errores aleatorios no se pueden asignar a una causa determinada. Normalmente se evalúan por medio de métodos estadísticos cuyo estudio detallado cae fuera de los límites de este texto, aunque se tratarán los aspectos básicos y elementales de aplicación directa a los analizadores de proceso.

Los errores sistemáticos se pueden asignar, normalmente, a causas específicas propias del sistema de medida y se pueden reducir por medio de una adecuada calibración con muestras de referencia estándar.

Normalmente, este tipo de error es unidireccional y puede ser constante o variar con la concentración del componente analizado (o parámetro medido) en la muestra (por ejemplo, no linealidad). El error sistemático de una medida a menudo se conoce como “bias” o “sesgo”.

Los errores graves usualmente son el resultado de causas catastróficas o seria avería del instrumento.

Otros dos términos comúnmente asociados con la exactitud de la medida son el error global absoluto y el error global relativo.

El error global absoluto (e_a) de una medida x viene dado por la expresión:

$$e_a = x - x_t$$

Donde x_t es el valor real del parámetro medido.

El error global relativo (e_r) viene dado por la expresión:

$$e_r = \frac{x - x_t}{x_t}$$

Las dificultades surgen cuando uno trata de usar estas expresiones. Por lo general, el valor real x_t del parámetro medido nunca se conoce. El procedimiento habitual es remplazarlo por el valor medio “ m ” de una serie de medidas lo que suele ser una buena estimación del valor verdadero, siempre y cuando se hayan eliminado los errores sistemáticos. Como parte de los errores sistemáticos, la exactitud de un analizador de proceso depende de la exactitud en que se encuentra la variable analizada en el fluido de calibración.

En términos vulgares se puede decir que la exactitud de un instrumento de medida depende de los errores sistemáticos y de los aleatorios, o expresado de otra forma de su veracidad (comúnmente expresada también simplemente como exactitud) y su precisión.

Se suele expresar con valores (\pm) en unidades de ingeniería o porcentajes del valor medido o del valor del span o del fondo de escala (fsd).

Desde el punto de vista del funcionamiento operativo de un analizador de proceso, generalmente es más importante el valor de la precisión o de la repetibilidad que el de la veracidad o exactitud.

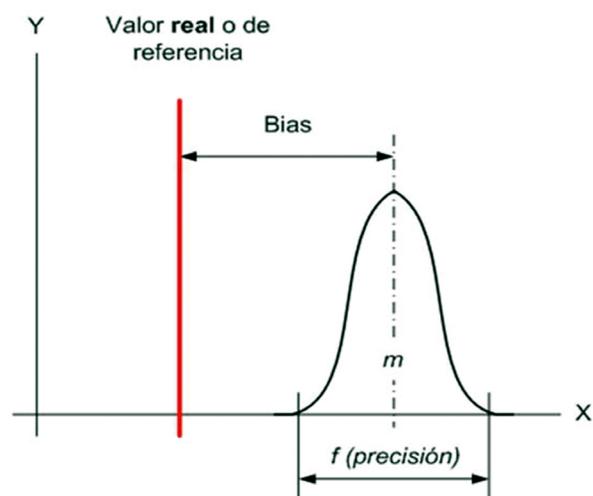


Figura 1.12. Exactitud-Precisión.

1. Según ANSI/ISA-51.1-1979 (R1993): **Accuracy**: In process instrumentation, degree of conformity of an indicated value to a recognized accepted standard value, or ideal value.