

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



AUTOMATIZACION DE PH EN EL JUGO ENCALADO

INFORME DE SUFICIENCIA

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:
RICHARD ENRIQUE PAREDES FERNANDEZ**

**PROMOCIÓN
2001 – II**

**LIMA – PERÚ
2011**

AUTOMATIZACION DE PH EN EL JUGO ENCALADO

Este trabajo, se lo dedico a mí familia, por su gran apoyo y comprensión.

SUMARIO

En el presente informe se expone la concepción, diseño adaptado, instalación y operación de la automatización de la medida del Ph, dentro del circuito del jugo encalado del procesamiento industrial de la caña de azúcar, para obtener el azúcar como producto final, como parte de ello, se abordan los siguientes temas; la línea del proceso que requiere el valor del pH como parámetro que genera regulaciones, la descripción de los métodos típicos de medición de pH y su carácter poco confiable como parámetro de tiempo real, la importancia que tiene el control del Ph como parte de la supervisión y el control del proceso, asimismo se realizara el análisis comparativo entre el método clásico y el nuevo método actualizado que incluyen la automatización del sistema de medición de Ph permitiendo así la optimización de los procesos en las industrias; y finalmente la aplicación práctica y los resultados obtenidos en el proceso industrial beneficiado con dicha innovación.

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I	
INTRODUCCIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL.....	2
1.1 Tipos de Señales y Sistemas	3
1.1.1 Señales Analógicas	3
1.1.2 Señales discretas	3
1.1.3 Señales discretas en tiempo	3
1.1.4 Señales discretas en amplitud	3
1.1.5 Señales discretas en amplitud y tiempo	4
1.2 Sistemas combinatoriales y secuenciales	4
1.3 Sistemas de Control dinámico.....	4
1.3.1 Sistemas de lazo abierto	4
1.3.2 Sistemas en lazo cerrado	5
1.4 Caracterización de un sistema lineal invariante en el tiempo.	6
1.4.1 Modelo de un sistema	6
1.4.2 Clasificación de sistemas	6
1.4.3 Función de Transferencia	7
1.5 Características de un sistema de control de tiempo continuo	9
1.5.1 Topología en lazo abierto	9
1.5.2 Topología en lazo cerrado	10
1.6 Diagrama de bloques	12
1.7 Sistemas de control en tiempo discreto	14
1.8 Muestreo y reconstrucción	16
1.9 Teorema del muestreo	19
1.10 La transformada Z	22
1.11 Respuesta temporal de un sistema lineal analógico frente a una entrada muestreada.	24
1.12 Análisis temporal de sistemas continuos y descritos.	27
1.13 Estabilidad absoluta de sistemas lineales	32
CAPITULO II	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	39
2. Medición tradicional en la medición de pH	

2.1	Primer Método	39
2.2	Segundo Método.....	39
CAPITULO III		
ASPECTOS TEÓRICOS DE LA MEDICIÓN DE PH.....		41
3.1	Ácidos y Bases.- Teoría de Arrhenius.....	41
3.2	Teoría de Ácidos de Bronsted-lowry	41
3.3	La autoionización del agua y la escala de pH.	44
3.4	Ácidos fuertes y bases fuertes	47
3.5	Ácidos débiles y bases débiles	48
3.6	Identificación de ácidos y bases débiles	49
3.6.1	Cómo calcular el pH de una disolución muy diluida de un ácido débil.....	51
3.7	Estructura molecular y carácter ácido – base	52
3.7.1	Fuerza de los ácidos binarios.	52
3.7.2	Fuerza de oxácidos.	53
3.7.3	Fuerza de ácidos orgánicos	54
3.8	Ácidos y bases de Lewis	56
3.8.1	Disoluciones reguladoras.....	59
3.8.2	Indicadores ácido base	61
3.9	Reacciones y neutralización y curvas de valoración	64
3.9.1	Potenciales de electrodo y su medida	64
CAPITULO IV		
IMPLEMENTACIÓN DE LA MEDIDA AUTOMATIZADA DEL PH		77
4.1	Descripción y Características de la Implementación de la Automatización.-Automatismo	77
4.2	Necesidades de un automatismo	77
4.3	Lazos de control	79
4.4	Controladores programables	80
4.5	Sensor de PH	80
4.6	Implementación de la automatización en la medición de PH.	81
CAPITULO V		
ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS		83
5.1	Comparación de la medición en laboratorio y medición en el proceso.	84
5.2	Causas de las diferencias	85
CAPITULO VI		
APLICACIÓN.....		86
6.1	Caleación.....	86
6.2	Características del punto de medición	86

CONCLUSIONES.....	88
ANEXO A	
INTRODUCCION A LOS AUTOMATISMO	
ANEXO B	
AUTOMATAS PROGRAMABLES INDUSTRIALES	
ANEXO C	
DISEÑO ESTRUCTURADO	
ANEXO D	
ESQUEMA DE CONEXIONADO ELECTRICO Y DE COMUNICACIONES	
BIBLIOGRAFÍA	

INTRODUCCIÓN

En un mundo globalizado y altamente competitivo en el que vivimos, las empresas en general buscan siempre mecanismos para mejorar la eficiencia de sus procesos así como también la calidad de sus productos.

El consumo de productos manufacturados, se da en la actualidad con una tendencia creciente, para muchos el control de los procesos a los cuales son sometidas las materias primas pasa desapercibido, quiere decir que no hay la percepción de la competencia, tampoco visión de futuro de empresa; mientras que para otros, estar actualizado y tener el control de la eficacia de los procesos de producción es muy importante, por que permite obtener un producto manufacturado, en un tiempo óptimo y de alta calidad y sobre todo mantenerse en el mercado.

En la actualidad tanto en el contexto industrial del continente americano como en el del continente europeo, los procesos que involucran sistemas de medición de pH son totalmente automatizados, gracias a ello obtienen niveles de producción elevados y logran la optimización del uso de insumos y recursos y se logra alta rentabilidad.

El objetivo del presente trabajo es dar a conocer los equipos que permiten la automatización en la medición de pH, que es muy importante en la optimización de recursos y permite obtener productos de alta calidad.

Se describe los métodos antiguos de medición del pH y asimismo se explica en que consiste la nueva tecnología que permite automatizar el proceso en la medición del pH.

CAPITULO I

LA AUTOMATIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE PRODUCCION

1. Introducción a los sistemas de control

Desde el punto de vista de la teoría de control, un sistema o proceso está formado por un conjunto de elementos relacionados entre sí que ofrecen señales de salida en función de señales o datos de entrada.

Es importante resaltar el hecho de que no es necesario conocer el funcionamiento interno, o cómo actúan entre sí los diversos elementos, para caracterizar el sistema. Para ello, sólo se precisa conocer la relación que existe entre la entrada y la salida del proceso que realiza el mismo (principio de caja negra). El aspecto más importante de un sistema es el conocimiento de su dinámica, es decir, cómo se comporta la señal de salida frente a una variación de la señal de entrada. Un conocimiento preciso de la relación entrada/salida permite predecir la respuesta del sistema y seleccionar la acción de control adecuada para mejorarla. De esta manera, el diseñador, conociendo cuál es la dinámica deseada, ajustará la acción de control para conseguir el objetivo final.

Se puede definir un sistema de control como el conjunto de elementos que interactúan para conseguir que la salida de un proceso se comporte tal y como se desea, mediante una acción de control.



Fig. 1.1. Diagrama de un sistema de control

1.1 Tipos de señales y sistemas

Consideraremos como señales las variaciones a lo largo del tiempo de las entradas o salidas de un sistema. Obviamente, estas señales pueden ser de distinta naturaleza, y por tanto sus unidades físicas pueden ser diversas. Según cómo sea la variación de estas

señales, podemos clasificarlas dentro de dos grandes grupos: señales analógicas y señales discretas.

1.1.1 Señales analógicas: Son aquellas cuya variación, tanto en amplitud como a lo largo del tiempo, es continua. Es decir, pueden tomar cualquier valor real, en cualquier instante de tiempo.

Amplitud

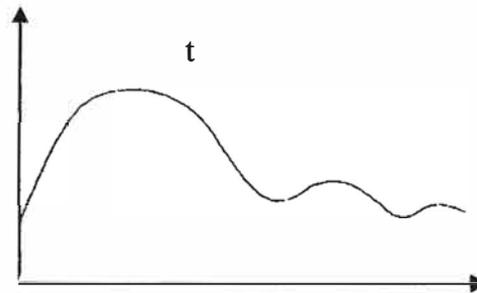


Fig. 1.2. Señal analógica

1.1.2 Señales discretas: Este tipo de señales no tiene una variación continua como las anteriores, sino que su evolución se rige por un determinado conjunto finito de valores posibles. Según dónde tome este conjunto de valores, podremos distinguir entre señales discretas en amplitud o discretas en tiempo.

1.1.3 Señales discretas en tiempo: Sólo tienen valor en instantes de tiempo predeterminados. Y aunque su amplitud puede ser cualquier valor dentro del rango de los reales, el valor de la señal entre dos instantes de tiempo consecutivos no está definido.

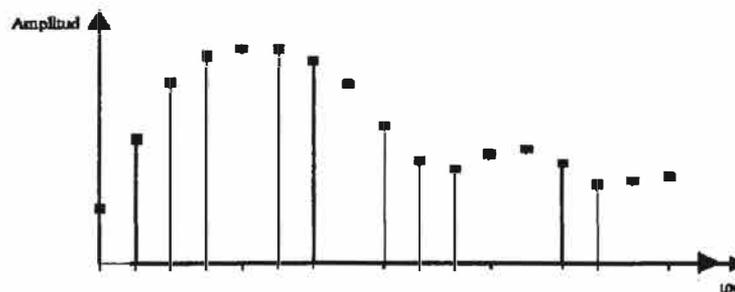


Fig. 1.3. Señal discreta en tiempo

1.1.4 Señales discretas en amplitud: En este caso, la señal toma valor en cualquier instante de tiempo, pero estos valores de amplitud pueden encontrarse entre los definidos en el conjunto predeterminado.

1.1.5 Señales discretas en amplitud y tiempo: Son una mezcla de los dos tipos anteriores, es decir, la señal sólo podrá tomar valores predeterminados en instantes de tiempo predeterminados.

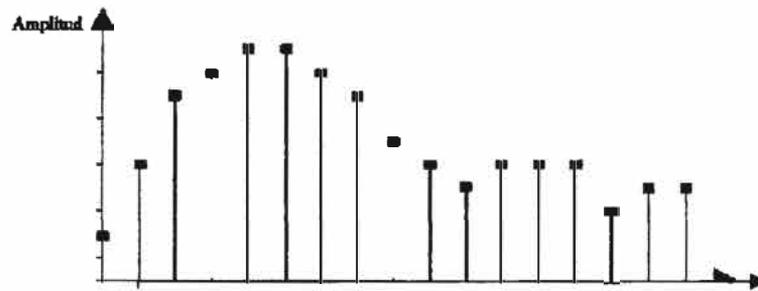


Fig. 1.4. Señal discreta en amplitud y tiempo

1.2 Sistemas combinacionales y secuenciales

Los sistemas combinacionales y secuenciales pueden clasificarse como sistemas de control basados en instrucciones lógicas. Los datos de entrada y salida al sistema son binarios e indican que los sensores tienen dos estados o valores (por ejemplo: válvula abierta o cerrada, un indicador activado o no, o un interruptor pulsado o no). Las decisiones tomadas por el sistema de control son del tipo on/off y se basan en las condiciones de los datos de entrada.

1.3 Sistemas de control dinámico

Dependiendo del tratamiento que el sistema de control realiza con la señal de salida, pueden distinguirse dos topologías de control generales: sistemas en lazo abierto y sistemas en lazo cerrado.

1.3.1 Sistemas en lazo abierto

En este tipo de sistemas, la salida no tiene efecto alguno sobre la acción de control.



Fig. 1.5. Diagrama de bloques de un sistema en lazo abierto

En un sistema en lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia, por ello cada entrada corresponderá a una operación prefijada sobre la señal de salida. Se puede asegurar entonces que la exactitud del sistema depende en gran manera de la calibración del mismo y, por tanto, la presencia de perturbaciones en la cadena (señales indeseadas) provocará que éste no cumpla la función asignada.

Para poder considerar una topología en lazo abierto, es necesario conocer la relación entrada/salida y garantizar la inexistencia de perturbaciones externas o de variaciones de

los parámetros internos del sistema. Esto es, en general, difícil de cumplir en la práctica, y su realización implica sistemas excesivamente caros.

Un ejemplo de este tipo de topología se puede encontrar en el control de un cabezal de máquina de escribir electrónica. En este sistema, la entrada viene dada por el teclado; la señal generada por éste se procesa y se genera la acción de control, que provocará, como salida, la rotación del cabezal a la posición adecuada y la impresión de la letra deseada.

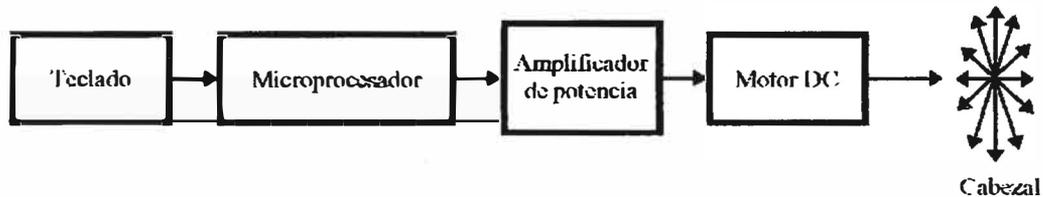


Fig. 1.6. Diagrama de bloques del control de un cabezal de impresión

Como se puede suponer, una perturbación de origen externo puede falsear la señal en cualquier punto de la cadena y como resultado obtendremos una salida diferente de la deseada.

1.3.2 Sistemas en lazo cerrado

En los sistemas de control en lazo cerrado, la señal de salida tiene efecto sobre la acción de control. A este efecto se le denomina realimentación.

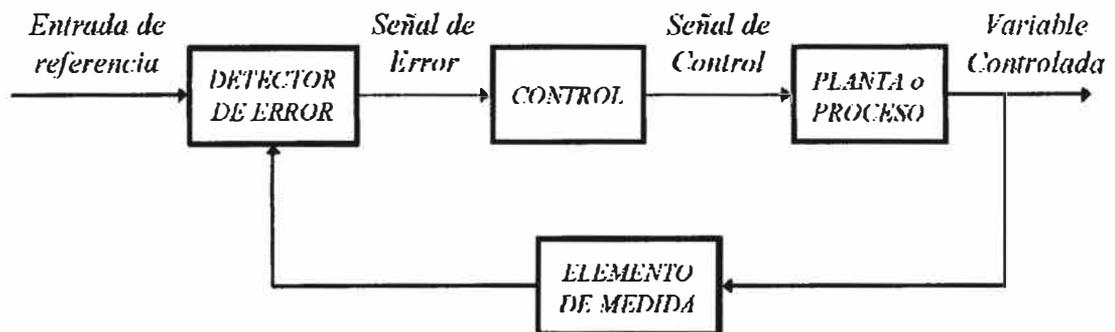


Fig. 1.7. Diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado

La señal controlada debe realimentarse y compararse con la entrada de referencia, tras lo cual se envía a través del sistema una señal de control, que será proporcional a la diferencia encontrada entre la señal de entrada y la señal medida a la salida, con el objetivo de corregir el error o desviación que pudiera existir.

La principal ventaja de los sistemas de control en lazo cerrado es que el uso de la realimentación hace al conjunto menos sensible a las perturbaciones externas y a las variaciones de los parámetros internos que los sistemas en lazo abierto.

Para nuestra aplicación usaremos el sistema en lazo cerrado.

1.4 Caracterización de un sistema lineal invariante en el tiempo

1.4.1 Modelo de un sistema

Un sistema físico puede caracterizarse dinámicamente a través de las ecuaciones diferenciales que describen las leyes físicas que rigen el comportamiento de dicho sistema. Se debe tener en cuenta que una descripción completa y precisa del sistema físico puede resultar demasiado compleja y laboriosa; por ello debemos modelar el sistema llegando a un compromiso entre la exactitud y la sencillez requeridas al sistema. En cualquier caso se debe garantizar que el modelo obtenido responda a las exigencias iniciales del estudio, pues ello determina el rango de validez de un modelo (por ejemplo: alta frecuencia en un estudio circuital). De hecho, un modelo será válido mientras se cumplan las hipótesis que han permitido simplificarlo.

Por último, ha de indicarse que el campo de estudio del modelado de sistemas se encuentra actualmente en fase de determinación de las reglas de identificación de sistemas, utilizándose para ello software de alto nivel.

1.4.2 Clasificación de sistemas

Los sistemas pueden clasificarse en sistemas lineales y no lineales; otra posible clasificación los divide en sistemas variantes o invariantes en el tiempo.

a) **Sistemas lineales:** son aquellos que pueden describirse mediante ecuaciones diferenciales lineales. La propiedad más importante es que permiten el principio de superposición. Esta propiedad puede utilizarse para determinar de un modo experimental si un sistema es o no lineal.

b) **Sistemas no lineales:** son aquellos que no son lineales; es decir, se caracterizan por ecuaciones diferenciales no lineales. En realidad todo sistema es no lineal, aunque la mayoría es linealizable a tramos (circunstancia que se utiliza para poder caracterizar un sistema no lineal como uno lineal en un entorno determinado). En este tipo de sistemas, el principio de superposición no es aplicable.

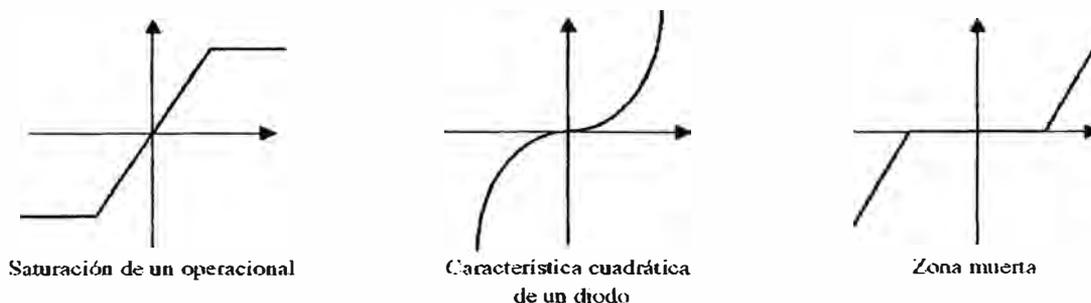


Fig. 1.8. Ejemplos del sistema no lineales

Linealización:

Dada una función no lineal $y = f(x)$, su linealización en el entorno de un determinado punto de trabajo (x_0, y_0) se obtiene de la forma siguiente:

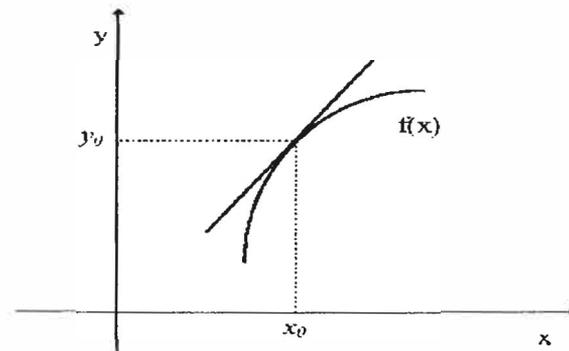


Fig. 1.9. Tangencia en el punto $X = X_0$

$$\text{donde } y - y_0 = \left(\frac{dF(x)}{dx} \right) \Big|_{x=x_0} (x - x_0) \quad (1.1)$$

Que coincide con la ecuación de la recta de pendiente igual a la derivada de la función no lineal en el punto (x_0, y_0) , y que pasa por dicho punto. Debe observarse que la diferencia entre la recta y la función no lineal indica el rango de validez del modelo, es decir, la tolerancia permitida debe ser mayor que dicha diferencia.

1.4.3 Función de transferencia

En general, cualquier sistema lineal invariante en el tiempo (SLIT) puede modelarse mediante una ecuación diferencial de la forma:

$$a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + a_2 y^{(n-2)} + \dots + a_n y - b_0 x^{(m)} + b_1 x^{(m-1)} + b_2 x^{(m-2)} + \dots + b_m x$$

$$\text{donde: } y^{(n)} = \frac{d^n y}{dt^n} ; n \geq m \quad (1.2)$$

Esta ecuación diferencial relaciona la señal de salida $y(t)$ de un sistema con la señal de entrada $x(t)$ al mismo, y permite conocer la respuesta de dicho sistema a una señal de entrada determinada, mediante su resolución. A esta ecuación diferencial se le denomina ecuación característica del sistema.

La función de transferencia de un sistema lineal invariante en el tiempo se obtiene realizando la transformada de Laplace de la ecuación característica del sistema, con condiciones iniciales nulas.

Ecuación característica:

$$a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + a_2 y^{(n-2)} + \dots + a_n y = b_0 x^{(m)} + b_1 x^{(m-1)} + b_2 x^{(m-2)} + \dots + b_m x \quad (1.3)$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = G(s) = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n} \quad (n \geq m)$$

donde $n \equiv$ orden del sistema

(1.4)

Modelo del sistema:



$$\text{Función de transferencia: } G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \text{ con } CI = 0$$

La función de transferencia contiene toda la información de la dinámica del sistema.

En concreto, la característica dinámica del sistema depende fundamentalmente de las raíces del denominador de la función de transferencia; estas raíces se denominan polos de la función de transferencia. Al polinomio obtenido en el denominador de una función de transferencia se le denomina polinomio característico.

Para que un sistema sea físicamente realizable, el orden del denominador debe ser mayor o igual (de hecho en la práctica siempre es mayor) que el orden del numerador, de este modo se garantiza que el sistema es causal.

En la figura (1.10)

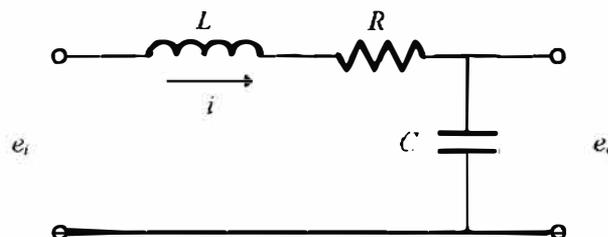


Fig. 1.10.

Para obtener la función de transferencia del circuito de la figura deberán seguirse los siguientes pasos:

- 1.- Plantear las ecuaciones diferenciales que definen cada elemento, esto es, aquellas que se obtienen a partir de las leyes físicas que rigen el comportamiento del sistema.
- 2.- Aplicar la transformada de Laplace con condiciones iniciales nulas.

$$\frac{Ti}{Cl} = 0 \Rightarrow Ei(s) = [LC \cdot s^2 + RC \cdot s + 1] \cdot Eo(s) \Rightarrow \frac{Eo(s)}{Ei(s)} = \frac{1}{LC \cdot s^2 + RC \cdot s + 1} \quad (1.5)$$

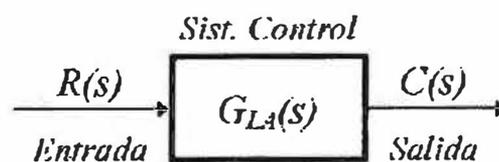
Debe observarse que la descripción de un sistema mediante su función de transferencia permite asignar características temporales a la posición de los polos en el plano S, lo cual proporciona mayor versatilidad que la descripción mediante la ecuación diferencial característica. Así, por ejemplo, puede afirmarse que el sistema tiene un comportamiento como oscilador cuando $R=0$, dado que, en este caso, sus raíces son imaginarias puras.

$$R = 0 \Rightarrow \frac{Eo(s)}{Ei(s)} = \frac{1}{LC \cdot s^2 + 1} = \frac{1}{(s + j\sqrt{LC}) \cdot (s - j\sqrt{LC})} \quad (1.6)$$

Por último, resaltar que la función de transferencia no ofrece información sobre la estructura física del sistema, con lo cual diversos sistemas físicos pueden tener la misma función de transferencia, aplicándose, de este modo, el concepto de sistema análogo. Los sistemas análogos son útiles cuando alguno de los sistemas es complejo, caro, frágil o de respuesta muy lenta (por ejemplo, en aplicaciones con prototipos electrónicos).

1.5 Características de un sistema de control de tiempo continuo

1.5.1 Topología en lazo abierto



$$G_{LA}(s) = \frac{C(s)}{R(s)} \quad (\text{relación entrada / salida})$$

Recordemos que un sistema de control, generalmente estará formado por diversos sistemas (planta, control, etc.). La topología típica en sistemas en lazo abierto es:

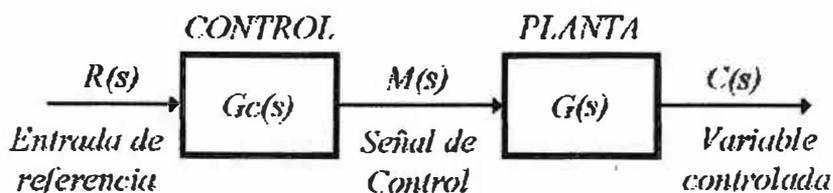


Fig. 1.11. Diagrama de bloques de un sistema en lazo abierto

Obteniéndose: $\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{M(s)}{R(s)} \cdot \frac{C(s)}{M(s)} = G_c(s) \cdot G(s)$ como función de transferencia del sistema.

1.5.2 Topología en lazo cerrado

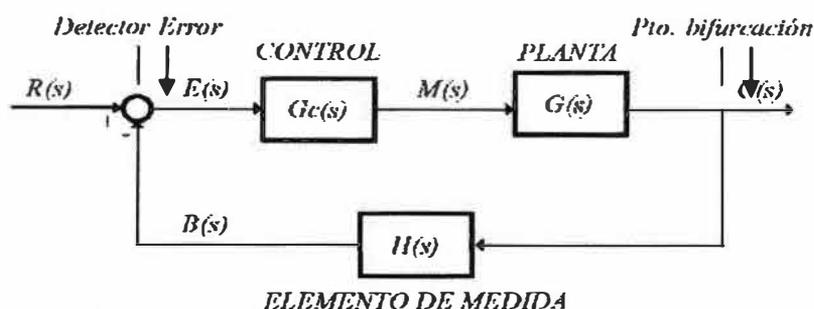


Fig. 1.12 Diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado

El detector de error produce una señal resultante de la diferencia existente entre la referencia de entrada y la señal de realimentación del sistema (realimentación negativa). La señal originada en el detector de error se denomina señal de error.

El punto de bifurcación permite trasladar la señal de salida al punto de entrada, efectuando así la realimentación deseada.

El elemento de medida es un transductor o sensor que mide el valor de la señal de salida y adapta la naturaleza sus características a las necesarias para poder realizar la comparación con la señal de referencia.

Generalmente, sus características dinámicas son más rápidas que las propias del sistema que se debe controlar (adquisición de señal mucho más rápida que la dinámica propia del sistema); en este caso se puede considerar $H(s) = k$; en el caso $k = 1$ se dice que existe realimentación unitaria; si no fuese así, deberíamos considerar las características dinámicas del elemento de medida a través de su función de transferencia $H(s)$.

Definiciones:

1. Función de transferencia en lazo abierto (ganancia de lazo):

$$= \frac{G(s) \cdot B(s)}{L(s)} - G_c(s) \cdot G(s) \cdot H(s) \quad (1.7)$$

2. Función de transferencia directa:

$$G_D(s) = \frac{C(s)}{E(s)} = G_c(s) \cdot G(s) \quad (1.8)$$

3. Función de transferencia en lazo cerrado:

$$G_{L.C.}(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s) \cdot G(s)}{1 + G_c(s) \cdot G(s) \cdot H(s)} = \frac{G_D(s)}{1 + G_{T.A.}(s)} \quad (1.9)$$

Cabe destacar, por último, que en el caso para el cual se cumpla que la ganancia de la función de transferencia directa es alta ($G_c(s) \cdot G(s) \gg 1$) y se posea realimentación unitaria ($H(s) = 1$), la señal de salida y la señal de entrada son iguales, lo cual proporciona una robustez muy importante frente a perturbaciones externas y variaciones de parámetros internos:

* Sistema en lazo cerrado sometido a una perturbación:

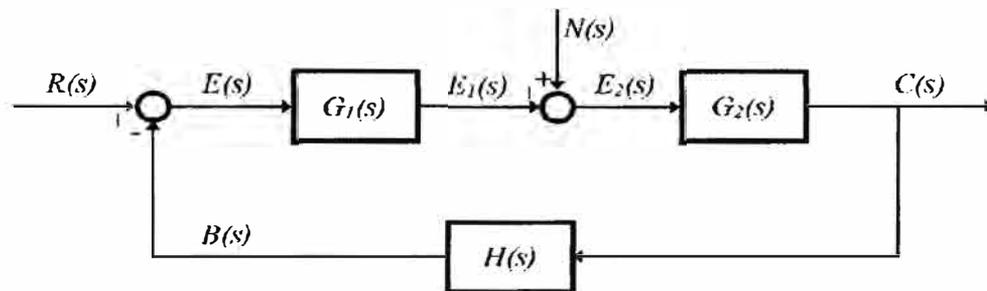


Fig. 1.13 Perturbación externa representada por $N(s)$

Aplicando superposición, se obtiene la señal de salida:

$$C(s) = \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} \cdot N(s) + \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} \cdot R(s) \quad (1.10)$$

Comparando con la salida que se obtendría en lazo abierto:

$$C(s) = G_2(s) \cdot N(s) + G_1(s)G_2(s) \cdot R(s) \quad (1.11)$$

Se observa como se ha reducido la sensibilidad del sistema frente a perturbaciones externas; en concreto, si la ganancia de lazo es elevada, la señal de salida depende exclusivamente de la función de transferencia de la realimentación, aunque ello puede acarrear problemas de estabilidad adicionales.

* Reducción de la sensibilidad frente a variaciones internas.

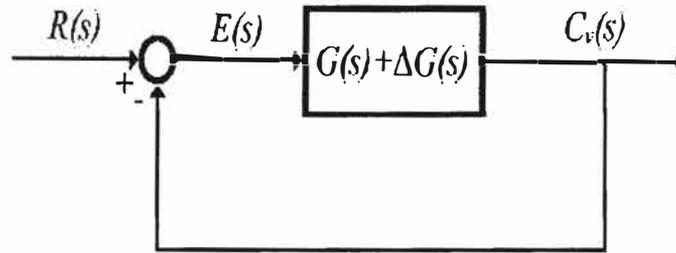


Fig. 1.14 Variaciones internas de la función de transferencia representadas por $\Delta G(s)$

La función de transferencia en lazo cerrado es:

$$C_v(s) = C(s) + \Delta C(s) = \frac{G(s) + \Delta G(s)}{1 + \Delta G(s) + G(s)} \cdot R(s) \approx \frac{G(s)}{1 + G(s)} \cdot R(s) + \frac{\Delta G(s)}{1 + G(s)} \cdot R(s) \quad (1.12)$$

$$\text{así: } \Delta C(s) = \frac{\Delta G(s)}{1 + G(s)} \quad (1.13)$$

$$C_v(s) \Big|_{LA} = C(s) + \Delta C(s) = R(s) \cdot G(s) + \Delta G(s) \cdot R(s),$$

$R(s)$, que es menor que el efecto que obtendríamos en el caso del sistema en lazo abierto reduciéndose de este modo la sensibilidad del sistema frente a variaciones de parámetros internos. De hecho, un sistema en lazo abierto exige componentes más precisos, mejor calibración y es, por lo tanto, más caro.

1.6 Diagrama de bloques

Características de un diagrama de bloques:

- 1.- Es una representación gráfica del flujo de señales y de la función realizada por cada componente de un sistema.
- 2.- Refleja una característica unilateral (salida/entrada).
- 3.- Dado un diagrama de bloques, el sistema al cual representa no es único, ya que contiene información respecto a su comportamiento dinámico y no sobre su constitución interna.
- 4.- El diagrama de bloques de un sistema dado no es único (depende de la definición de variables internas); sin embargo, la función de transferencia resultante sí es única.

Técnicas de trazado del diagrama de bloques:

- 1.- Describir las ecuaciones diferenciales de cada componente del sistema.
- 2.- Aplicar la transformada de Laplace con condiciones nulas.

3.- Representar individualmente el diagrama de bloques de cada ecuación diferencial.

4.- Unir los bloques a través de sus variables de entrada y salida.

En la figura (1.15)

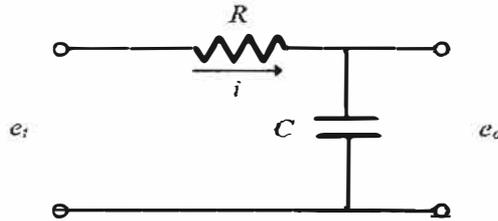


Fig. 1.15 Circuito RC

1.- Plantear las ecuaciones diferenciales.

$$\begin{cases} i = \frac{e_i - e_o}{R} \\ e_o = \frac{1}{C} \int i \cdot dt \end{cases} \quad (1.14)$$

2.- Aplicar la transformada de Laplace con condiciones iniciales nulas.

$$\begin{cases} I(s) = \frac{E_i(s) - E_o(s)}{R} \\ E_o(s) = \frac{1}{Cs} \cdot I(s) \end{cases} \quad (1.15)$$

3.- Representación individual.

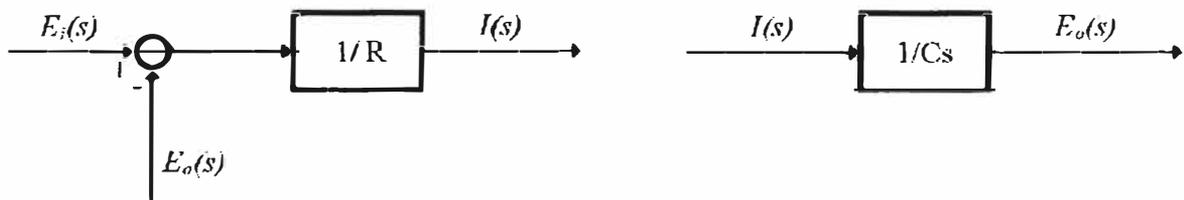


Fig. 1.16 Representación de las transformadas como funciones de transferencia

4.- Unir bloques individuales.

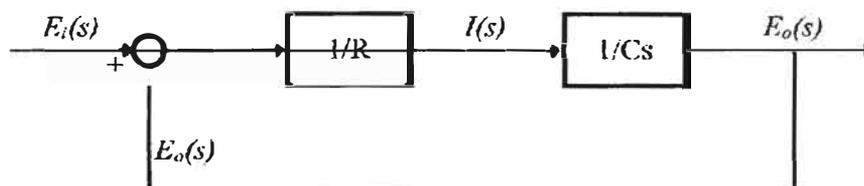


Fig. 1.17 Diagrama de Bloques Total del Sistema

Debe observarse que la metodología presentada exige una ordenación adecuada de las variables intermedias, de manera que la posterior unión de los diagramas individuales pueda realizarse de un modo simple; de hecho, es necesario que las variables intermedias aparezcan sólo una vez como resultado de un diagrama de bloques individual.

Álgebra de bloques:

El conjunto de reglas que permiten simplificar la estructura de un diagrama de bloques se denomina álgebra de bloques; debe indicarse que, al aplicar dichas reglas, el diagrama resultante es más simple, pero los nuevos bloques individuales son más complejos. Para aplicar adecuadamente álgebra de bloques, es necesario verificar que el producto de funciones de transferencia en sentido directo o en un lazo se mantenga constante tras la operación efectuada.

Metodología usual de síntesis:

1. - Desplazar puntos de bifurcación y puntos de suma.
2. - Intercambiar punto de suma.
3. - Reducir los lazos internos de realimentación.

1.7 Sistemas de control en tiempo discreto

Un sistema de control en tiempo discreto se caracteriza principalmente por realizar un procesamiento, mediante alguno de sus elementos, de señales discretas en el tiempo. La topología típica de un sistema discreto es la que se puede observar en la figura siguiente:

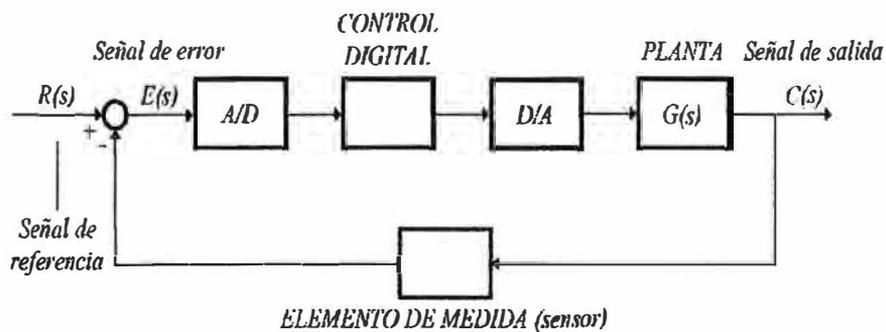


Fig. 1.18 Diagrama de bloques de un sistema de control discreto

Respecto a los sistemas analógicos se observa la inclusión de algunos elementos nuevos:

- Control digital o discreto: Sistema procesador diseñado para que el sistema de control logre las especificaciones requeridas. Este sistema trabaja u opera en instantes de tiempo predeterminados, múltiplos del periodo de muestreo y es, por tanto, un sistema síncrono. La operatividad del sistema o su funcionamiento de procesamiento queda caracterizada plenamente mediante su ecuación en diferencias:



$$y(n) = \sum_{p=1}^P a(p) \cdot y(n-p) + \sum_{q=0}^Q b(q) \cdot x(n-q)$$

donde: $y(n) \equiv$ muestras de salida del sistema procesador.

$x(n) \equiv$ muestras a la entrada del sistema procesador.

(1.16)

- Necesidad de interfaces A/D y D/A para convertir señales continuas en señales discretas y señales discretas en señales continuas, respectivamente. Permiten la introducción de un procesador discreto en el sistema de control y reconstruyen temporalmente la señal discreta en una señal continua en el tiempo.

La topología anterior es típica en sistemas discretos; sin embargo, no es la única topología posible. Una alternativa a la anterior se caracterizaría con el siguiente diagrama de bloques:

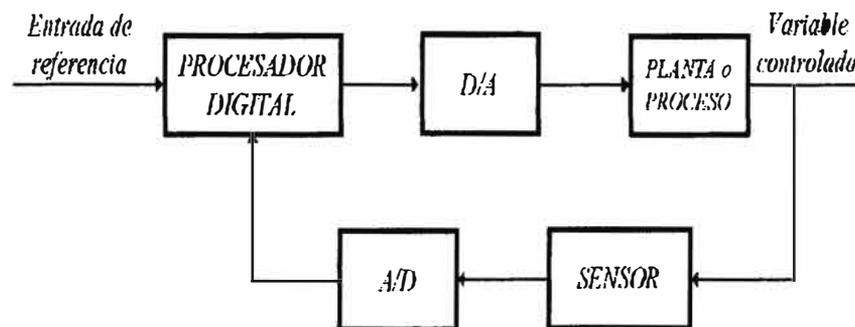


Fig. 1.19 Diagrama de bloques alternativo de un sistema discreto

En este caso el procesador digital incluye el detector de error y el control discreto del sistema. Debe observarse también que, en este caso, la señal de referencia es una señal digital, a diferencia de la topología anterior, que poseía una señal de referencia analógica. Sin embargo, la caracterización del sistema se puede realizar del mismo modo que en el caso anterior.

Debe observarse que el periodo de muestreo T depende fundamentalmente del tiempo de ciclo del programa que ejecuta el algoritmo de control; así, normalmente el tiempo de ciclo de programa suele ser mayor que el periodo de muestreo de los conversores A/D. En algunos casos, el periodo de muestreo se diseña para que sea mayor que el tiempo de ciclo (cuando las constantes de tiempo del proceso o planta son muy grandes), utilizándose el

resto de tiempo del procesador para realizar funciones de transmisión y representación de datos o, simplemente, funciones de gestión de posibles alarmas.

Ventajas del muestreo en sistemas de control:

- Mayor facilidad de realización.
- No existen derivas (ruido, interferencias, etc.).
- Son más compactos, menos pesados.
- Menor coste.
- Flexibilidad de programación.

1.8 Muestreo y reconstrucción

Se ha indicado previamente la necesidad de incluir dos sistemas importantes en un sistema de control en tiempo discreto:

- A/D: elemento encargado de muestrear, mantener y codificar la señal continua para lograr una señal digital que actuará como señal de entrada del controlador digital. Su estructura interna típica es:

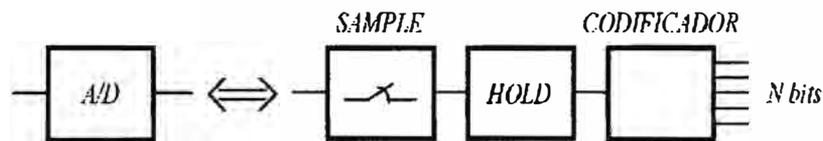


Fig. 1.20 Estructura interna del bloque A/D

- D/A: elemento encargado de decodificar y reconstruir la señal digital para lograr una señal continua en el tiempo que actuará como señal de entrada de la planta analógica. En general, no es deseable aplicar una señal muestreada a una planta analógica debido a los componentes inherentes de alta frecuencia presentes en la señal discreta. Por esta razón, al elemento reconstructor también se le denomina filtro de alisado.

Observando la topología típica de sistemas de control en tiempo discreto, surge la necesidad de caracterizar los procesos del muestreo y reconstrucción de las señales, con el propósito de facilitar su análisis.

- Caracterización del muestreo ideal: se define el muestreador ideal como un sistema que efectúa la siguiente operación con la señal continua:

$$e^*(t) = \sum_{k=0}^{\infty} e(t) \cdot \delta(t - kT)$$

(1.17)

donde: $e^*(t)$ = señal discreta resultado del muestreo. $e(t)$ = señal de entrada al muestreador. T = periodo de muestreo. $\delta(t)$ = función delta de Dirac.

Debemos observar que el muestreo ideal origina una señal que solo está definida en los instantes de muestreo (múltiplos del periodo de muestreo) y cuya amplitud es el producto de la amplitud de la señal continua en el instante de muestreo por la función impulso (amplitud infinita y área total unitaria); en conclusión, *el muestreo ideal no puede implementarse en la práctica, pero, como veremos más adelante, permite modelar perfectamente todo el proceso de muestreo y reconstrucción.*

Gráficamente el resultado es:

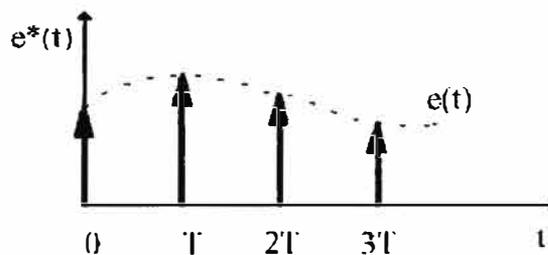
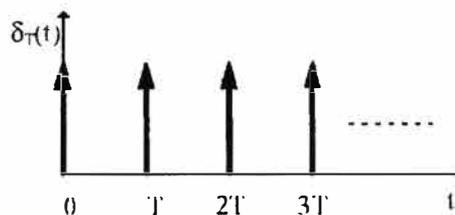


Fig. 1.21 Muestreo ideal

El muestreador ideal también es conocido como modulador de impulsos, ya que verifica la ecuación:

$$e^*(t) = e(t) \cdot \delta_T(t) \quad (1.13) \text{ donde: } \delta_T(t) \text{ } \circ \text{ tren de impulsos.}$$



Permitiendo el modelo:

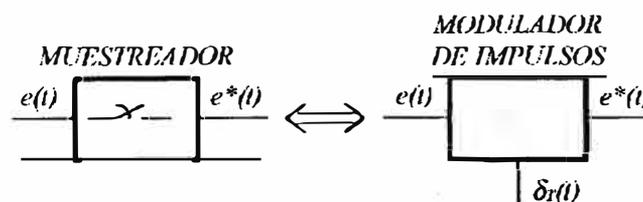


Fig. 1.22 Muestreo ideal como una modulación de impulsos

- Propiedades de la señal muestreada de forma ideal: Aplicando la transformada de Laplace en la expresión de una señal muestreada:

$$f^*(t) = \sum_{k=0}^{\infty} f(kT) \cdot \delta(t - kT)$$

$$f^*(t) = f(t) \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \delta(t - kT) = f(t) \cdot \delta_T(t)$$

$$F^*(s) = \sum_{k=0}^{\infty} f(kT) \cdot \mathcal{L}[\delta(t - kT)] = \sum_{k=0}^{\infty} f(kT) \cdot e^{-kTs} \quad (1.18)$$

En conclusión la transformada de Laplace de una señal muestreada no es una función polinómica, por lo que no será útil para trabajar con sistemas discretos y será necesario buscar una transformación alternativa que permita operar con funciones polinómicas en dichos sistemas; a esta nueva transformada se la denominará transformada Z.

Puede demostrarse una expresión alternativa de la transformada de Laplace de una señal muestreada.

- De este modo puede afirmarse que la transformada de Laplace de una señal discreta es periódica de periodo $j\omega_s$, verificando que si s_1 es un polo de $F(s)$ es polo de $F(s) = s_1 + j\omega_s$ es también polo de $F(s)$. La representación en plano transformado de Laplace implica una repetición en bandas centradas en $j\omega_s$ de las raíces (polos y ceros) de la señal muestreada. La banda principal se denomina banda primaria y el resto de bandas se denominan bandas complementarias. Si la localización de los polos y ceros de $F(s)$ es conocida, entonces queda automáticamente determinada la localización de las raíces en el resto del plano.

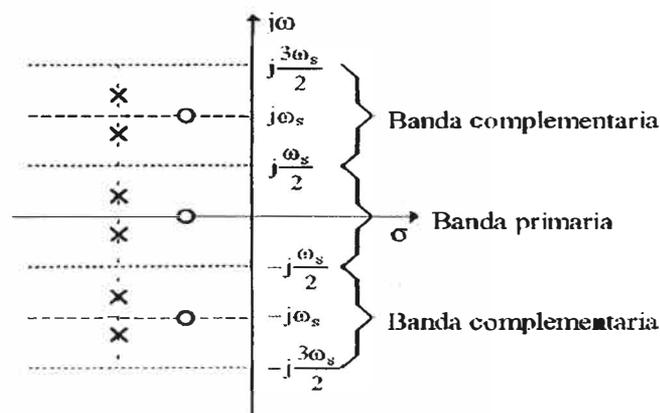
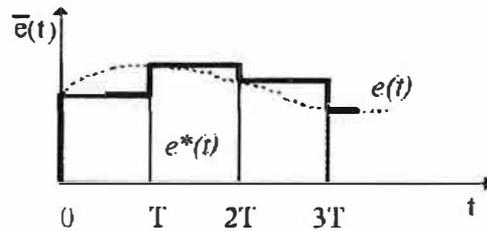


Fig. 1.23 Raíces en el plano S de la transformada de Laplace de una señal Muestreada

- Caracterización de la reconstrucción de señal: El dispositivo más simple de reconstrucción de datos, y también el más común, es el mantenedor de orden cero (ZOH).

El mantenedor de orden cero proporciona fundamentalmente, como valor de la señal de salida, el valor de la última muestra recibida a su entrada:

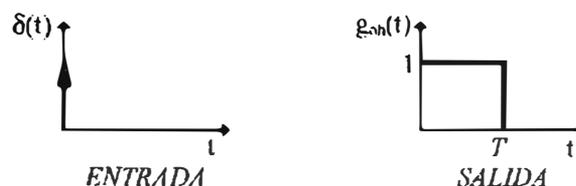
$$\bar{e}(t) = e(kT) \quad kT \leq t < (k+1)T$$



El mantenedor de orden cero es un sistema que no necesita memoria, a diferencia de otros tipos de mantenedores de datos, por esta razón es más económico y el más utilizado de todos ellos.

La respuesta impulsional de un mantenedor de orden cero se puede expresar como:

$$g_{oh}(t) = u(t) - u(t-T)$$



Aplicando la transformada de Laplace a esta respuesta impulsional, obtenemos la función de transferencia del mantenedor de orden cero:

$$g_{oh}(t) = u(t) - u(t-T) \xrightarrow{\mathcal{L}} G_{oh}(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \quad (1.19.)$$

Nótese que esta función de transferencia *no corresponde a ningún dispositivo físico*, porque se ha deducido suponiendo funciones impulso en la entrada del mantenedor de orden cero; sin embargo, si se utiliza junto con el muestreo ideal, proporcionan una buena descripción matemática del procedimiento de muestreo y reconstrucción real de las señales de un sistema de control en tiempo discreto.

1.9 Teorema del muestreo

Los sistemas de control en tiempo discreto conllevan de manera inherente operaciones de muestreo y reconstrucción de señales. Estos procesos deben verificar en todo momento el

teorema del muestreo, siendo este teorema fundamental en sistemas discretos, como se comprobará a continuación.

Sea una señal $f(t)$ con espectro de banda limitada:

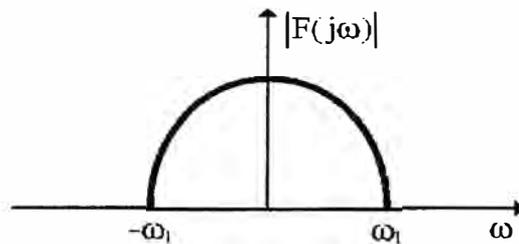


Fig. 1.24 Espectro de la señal $f(t)$

donde ω_1 es la máxima frecuencia que presenta $f(t)$.

Según la expresión

$$\Gamma^*(s) = \frac{1}{T} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} F(s \pm j \cdot n\omega_s), \quad (1.20.)$$

muestreo ideal equivale a una repetición de este espectro centrado en $n \cdot \omega_s$, con $n \in \mathbb{N}$.

De este modo el espectro de la señal muestreada con muestreo ideal puede sufrir dos situaciones diferentes:

a) $\omega_s \geq 2\omega_1$;

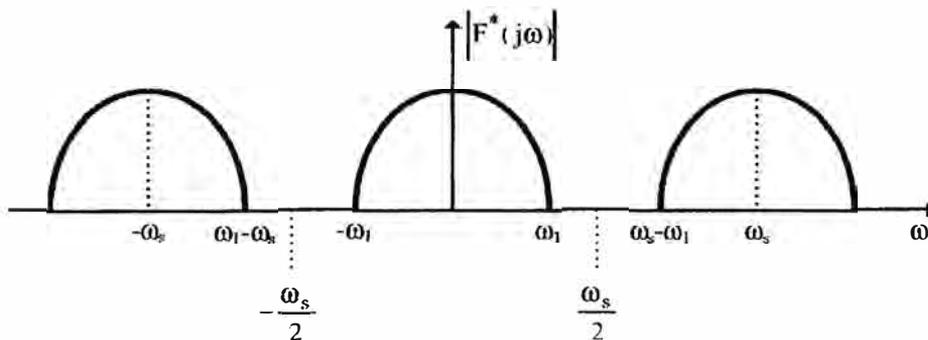


Fig. 1.25 Repetición del espectro de la señal debido al muestreo

Suponiendo que el mantenedor de orden cero es un filtro que pasa bajos ideal, se obtendría la señal previa al muestreo como salida del mismo. Sin embargo, un filtro paso bajos ideal no es causal, y por ello el mantenedor de orden cero distorsiona y no elimina totalmente las componentes en alta frecuencia de la señal muestreada, notándose más este efecto cuanto menor es la relación ω_s/ω_1 . En conclusión, interesa trabajar siempre con la relación ω_s/ω_1 lo más grande posible, despreciando de este modo los efectos del muestreo y reconstrucción.

b) $\omega_s < 2\omega_1$:

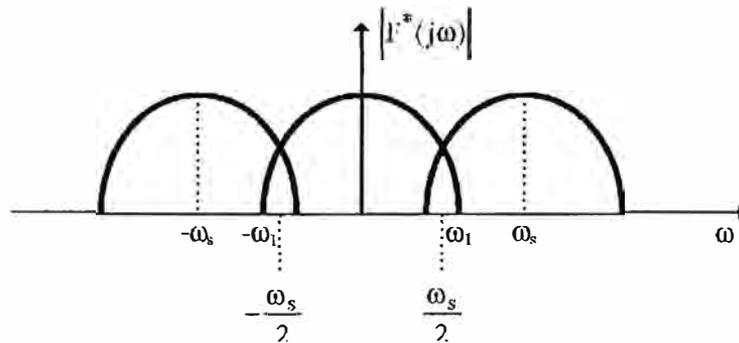


Fig. 1.26 Superposición de espectros (aliasing)

En este caso aparece un efecto de superposición de espectros que provocan que no sea posible recuperar la señal original previa al muestreo a partir de la señal muestreada, ni en el caso en el cual se realice un filtrado con filtro pasa bajo ideal. A este efecto se le denomina aliasing y siempre debe evitarse en un proceso de muestreo.

A la vista de las dos situaciones anteriores, se desprende la siguiente afirmación:

Teorema de Shannon (o del muestreo): "La mínima frecuencia de muestreo para poder recuperar una señal previa al muestreo, a partir de la señal muestreada a través de un filtro pasa bajos ideal es $\omega = 2\omega_1$, donde ω_1 es la máxima frecuencia que presenta la señal a muestrear."

Para poder recuperar la señal original previa al muestreo a partir de la señal muestreada, es necesario efectuar un filtrado paso bajo. Debe observarse que este filtrado ideal no puede realizarse en la práctica debido a que un filtro con característica espectral rectangular no es causal. Dicho filtrado se realiza normalmente mediante el mantenedor de datos de orden cero. En este caso la expresión del espectro del filtro resultante es:

$$G_{oh}(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \Rightarrow G_{oh}(j\omega) = \frac{1 - e^{-j\omega T}}{j\omega} = T \frac{\text{sen}\left(\frac{\omega T}{2}\right)}{\frac{\omega T}{2}} \cdot e^{-j\omega T/2} = \frac{2\pi}{\omega_s} \frac{\text{sen}\left(\frac{\pi\omega}{\omega_s}\right)}{\frac{\pi\omega}{\omega_s}} e^{-j\omega T/2}$$

$$G_{oh}(j\omega) = \frac{2\pi}{\omega_s} \cdot \text{sinc}\left(\frac{\pi\omega}{\omega_s}\right) \cdot e^{-j\pi\omega/\omega_s} \quad (1)$$

(1.21)

En la figura siguiente se observa como este filtro distorsiona la señal recuperada debido a un filtrado bastante alejado del ideal; este filtrado mejora cuanto mayor es la frecuencia de muestreo, proporcionando un resultado que coincide con el previsible a partir de una observación en dominio temporal.

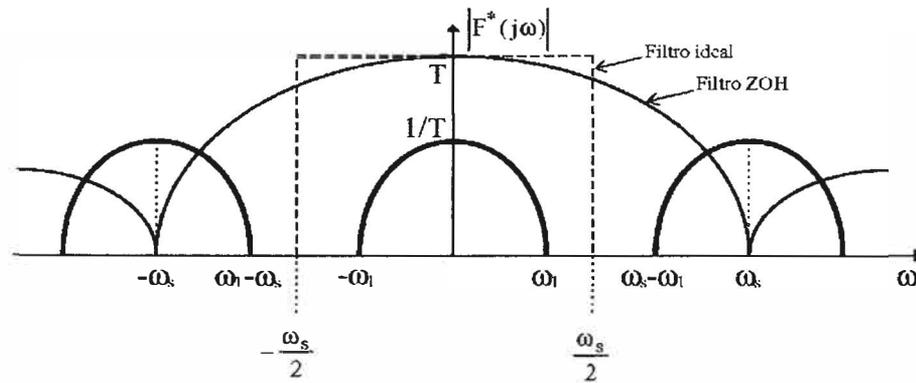


Fig. 1.27 Distorsión del espectro de la señal al recuperar con ZOH

1.10 La transformada Z

La transformada Z es una herramienta clásica para el análisis y síntesis de sistemas discretos. Se obtiene aplicando la transformada de Laplace en señales discretas, y su principal ventaja reside en la propiedad de transformar expresiones de tipo exponencial en expresiones polinómicas.

Sea la señal muestreada:

$$x^*(t) = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT) \cdot \delta(t - kT) = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT) \cdot \delta(t - kT) \quad (1.22)$$

Aplicando la transformada de Laplace, se obtiene:

$$\mathcal{L}[x^*(t)] = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT) \cdot e^{-kTs} = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT) \cdot e^{-kTs}$$

donde T es el periodo de muestreo.

(1.23)

Puede observarse que esta expresión es difícil de tratar debido a su naturaleza. Si utilizamos el cambio de variable:

$$z = e^{Ts}$$

Surge, de este modo, la definición de transformada Z:

$$X(z) = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT) \cdot z^{-k}$$

(1.24)

La transformada Z está relacionada inherentemente a un proceso de muestreo. De hecho, únicamente puede aplicarse sobre señales muestreadas, y en el proceso de realización de la antitransformada Z se obtiene una señal muestreada. En conclusión, ello implica que

diversas señales continuas puedan tener la misma transformada Z debido a que posean la misma señal muestreada.

Por otra parte, debe indicarse que la transformada Z ofrece como solución una serie que permitirá una expresión en forma de cociente de polinomios cuando converja; ello limitará el estudio a través de dicha expresión a zonas del plano Z donde se garantice la convergencia.

* Transformación de zonas del plano S al plano Z: Transformación de un punto del plano S:

$$s = -\sigma + j\omega \Rightarrow z = e^{Ts} = e^{-\sigma T} [\cos(\omega T) + j \cdot \sin(\omega T)] \quad (1.25)$$

De este modo:

$$\text{Re}[z] = e^{-\sigma T} \cdot \cos(\omega T) ; \text{Im}[z] = e^{-\sigma T} \cdot \sin(\omega T) \quad (1.26)$$

De la misma forma es posible transformar todos los puntos del plano S comprendidos en el interior de la banda primaria, como se puede observar en la figura 1.8.9

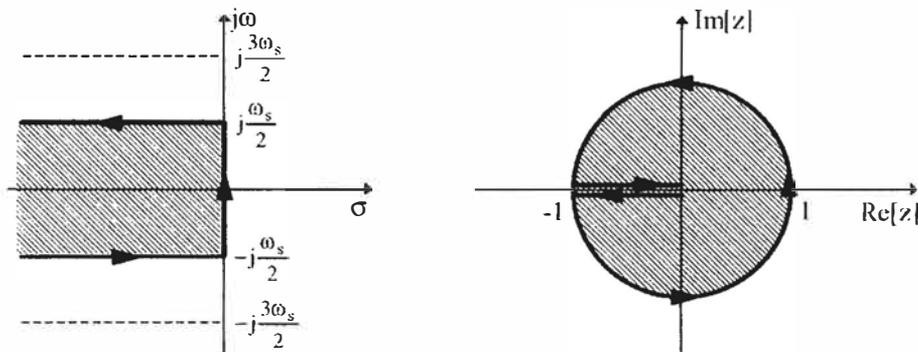


Fig. 1.28 Transformación de la banda primaria del plano S al plano Z

En conclusión, por periodicidad todas las bandas complementarias se transforman de forma análoga a la banda primaria. Así, todo el semiplano izquierdo del plano S se transforma en el interior del círculo de radio unidad en el plano Z, todo el semiplano derecho se transforma en el exterior del círculo de radio unidad y el eje imaginario se transforma en el propio círculo de radio unidad, determinando de este modo, la frontera de estabilidad. Debe observarse que el número de singularidades en plano Z es finito, a diferencia de lo que ocurría en el plano S, debido a la coincidencia en la transformación de las bandas complementarias respecto a la primaria.

1.11 Respuesta temporal de un sistema lineal invariante analógico frente a una entrada muestreada

Un sistema lineal invariante analógico queda plenamente caracterizado por su respuesta impulsional o por su función de transferencia (transformada de Laplace de la respuesta impulsional).

Frente a una entrada continua, el sistema proporciona una señal continua a la salida, resultado de la convolución analógica entre la señal de entrada y la respuesta impulsional del sistema. La transformada de Laplace de esta señal es igual al producto de la transformada de Laplace de la señal de entrada por la función de transferencia del sistema.

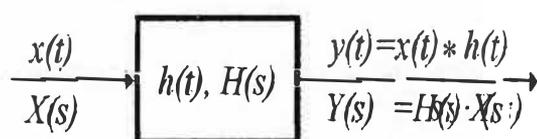


Fig. 1.29. Respuesta de un sistema continuo a una entrada continua

La respuesta de un sistema analógico frente a una señal muestreada también sigue siendo continua, y se puede caracterizar mediante la expresión:

$$c(t) = \sum_{k=0}^{\infty} r(KT) \cdot g(t - KT) \quad (1.27)$$

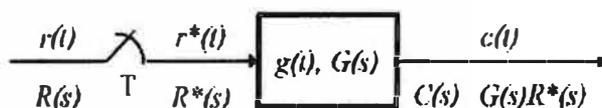


Fig. 1.30 Respuesta de un sistema continuo a una entrada discreta

Es importante enfatizar la influencia del periodo de muestreo en la señal de salida; debe observarse en la expresión anterior que el simple hecho de cambiar el periodo de muestreo implica, de un modo directo, cambiar la señal de salida. En concreto, el aumento del periodo de muestreo origina una señal de salida mucho más diferenciada respecto a la señal de salida del sistema frente a la misma señal de entrada sin muestrear, tendiendo a tener mayor sobreimpulso y perdiendo, por tanto, estabilidad relativa. Estos efectos pueden observarse en la gráfica

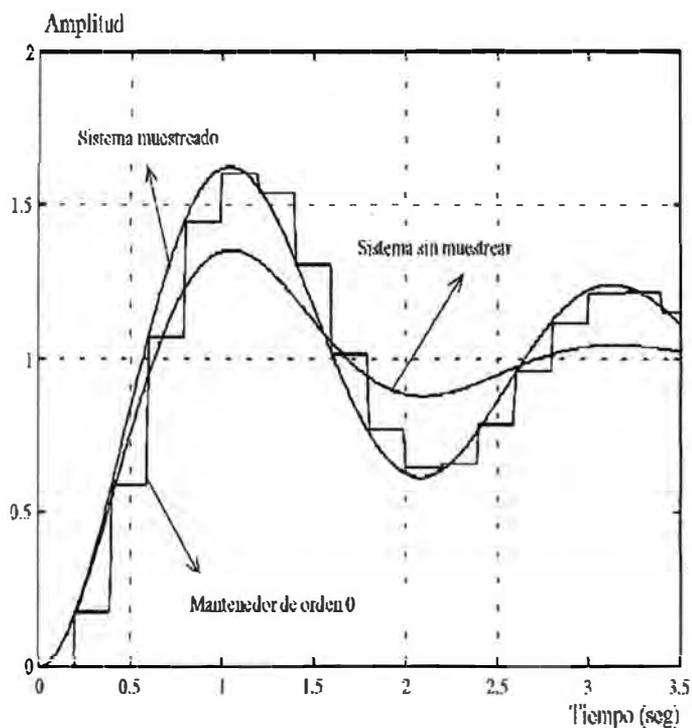


Fig. 1.31. Respuesta al escalón de un sistema discreto con periodo de muestreo $T=0.2$ seg.

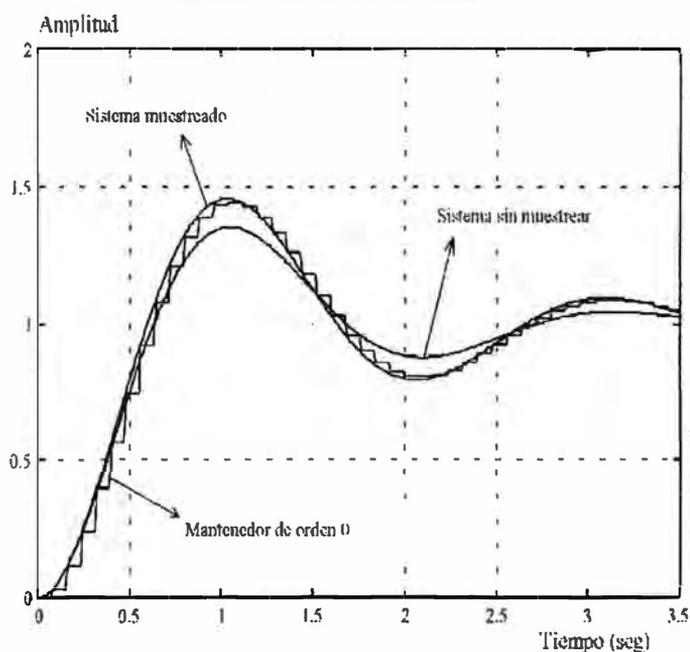
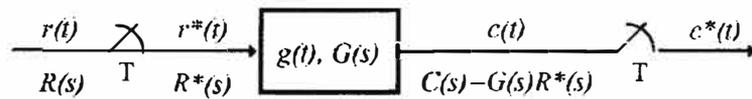


Fig. 1.32 Respuesta al escalón de un sistema discreto con período de muestreo $T=0.08$ seg.

El problema de caracterización de esta señal de salida es difícil de realizar por procedimientos habituales, y se plantea la cuestión del conocimiento de la señal de salida muestreada para, con las herramientas que disponemos en el dominio discreto, utilizar métodos de análisis semejantes a los usados en el dominio continuo:



$$c^*(t) = \sum_{k=0}^{\infty} c(kT) \cdot \delta(t - kT) \quad (1.27)$$

$$\text{donde: } c(kT) = \sum_{n=0}^k r(nT) \cdot g(kT - nT) \text{ es la expresión de la convolución discreta.} \quad (1.28)$$

$$\text{La señal } g^*(t) = \sum_{k=0}^{\infty} g(kT) \cdot \delta(t - kT) \text{ se denomina } \textit{respuesta impulsional discreta} \quad (1.29)$$

Permite caracterizar el sistema como un sistema discreto que ofrece una señal de salida discreta al tener una señal de entrada muestreada. Cumpliéndose así la propiedad: $C(z) = R(z) \cdot G(z)$, donde $G(z)$ es la función de transferencia en Z , que puede obtenerse aplicando la transformada Z sobre la respuesta impulsional discreta.

De este modo, la caracterización del sistema y el conocimiento de la señal de salida muestreada es sencillo; sin embargo, por esta metodología únicamente se puede conocer la señal de salida en instantes de muestreo y no la señal continua de salida que físicamente se genera en el sistema. Obsérvese que este efecto no es muy importante cuando el periodo de muestreo es mucho más pequeño que las constantes de tiempo del sistema analógico.

* Aplicación de la transformada Z a la resolución de ecuaciones en diferencias:

Un algoritmo que procesa señales muestreadas puede representarse mediante la resolución de una ecuación en diferencias de la forma:

$$y(n) = \sum_{p=1}^P a(p) \cdot y(n-p) + \sum_{q=0}^Q b(q) \cdot x(n-q) \quad (1.30)$$

Para resolver esta ecuación en diferencias puede aplicarse la transformada Z utilizando los teoremas de desplazamiento:

$$Z[f(t - nT)] = z^{-n} \cdot F(z) \quad (1.31)$$

$$[n-1]''$$

$$Z[f(t + nT)] = z^n \cdot F(z) f(kT) \cdot z^{-k} \quad (1.32) \quad L \quad k=0 \quad (1.31)$$

1.12 Análisis Temporal de Sistemas Continuos y Discretos

La respuesta temporal de un sistema lineal invariante en el tiempo puede descomponerse en dos partes: la respuesta transitoria y la respuesta estacionaria. De este modo, si denominamos $c(t)$ a la expresión de la respuesta temporal:

$$c(t) = c_l(t) + c_{ss}(t)$$

donde: $c_l(t)$ = Respuesta transitoria.

$c_{ss}(t)$ = Respuesta estacionaria.

La respuesta transitoria es originada por la propia característica dinámica del sistema y determina el comportamiento del sistema durante la transición de algún estado inicial hasta el estado final.

La respuesta estacionaria depende fundamentalmente de la señal de excitación al sistema y, si el sistema es estable, es la respuesta que perdura cuando el tiempo crece infinitamente.

De este modo hemos logrado determinar de un modo simple la estabilidad absoluta de un sistema; se dice que un sistema es estable si su respuesta transitoria decae a cero cuando el tiempo tiende a infinito.

Se define el error en estado estacionario como la diferencia entre la señal de referencia y la señal realimentada en estado estacionario en sistemas estables. Este error coincide con el valor estacionario de la señal originada por el detector de error.

Por otra parte, en sistemas de control, interesa minimizar la desviación de la señal de salida respecto a la señal de entrada en estado transitorio. Por esta razón se caracteriza la respuesta transitoria respecto a entradas típicas o estándares, conociendo que, como el sistema es lineal, la respuesta del sistema a señales más complejas es perfectamente predecible a partir del conocimiento de la respuesta a estas entradas de prueba más simples.

Generalmente, las entradas típicas son: función impulsional, función escalón, función en rampa y función parabólica en el tiempo; aunque la más importante de todas ellas es, sin duda, la función escalón.

Sistemas de primer orden.

Sistema de primer orden es aquel que únicamente posee un polo en su función de transferencia.

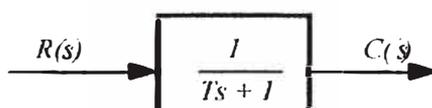


Fig. 1.33 Sistema de primer orden T: constante de tiempo de sistema

Respuesta al escalón:

$$r(t) = u(t) \xrightarrow{TL} R(s) = \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{1}{Ts+1} \cdot \frac{1}{s} \xrightarrow{TL^{-1}} c(t) = \left[1 - e^{-\frac{t}{T}} \right] \cdot u(t) \quad (1.32)$$

Obsérvese que $c(t) = 1$ cuando t tiende a infinito si $T > 0$; esto implica que el polo de la función de transferencia del sistema debe encontrarse en el semiplano izquierdo del plano transformado S . Si $T \leq 0$, el sistema no alcanza el estado estacionario, resultando, de este modo, el sistema inestable.

Gráficamente:

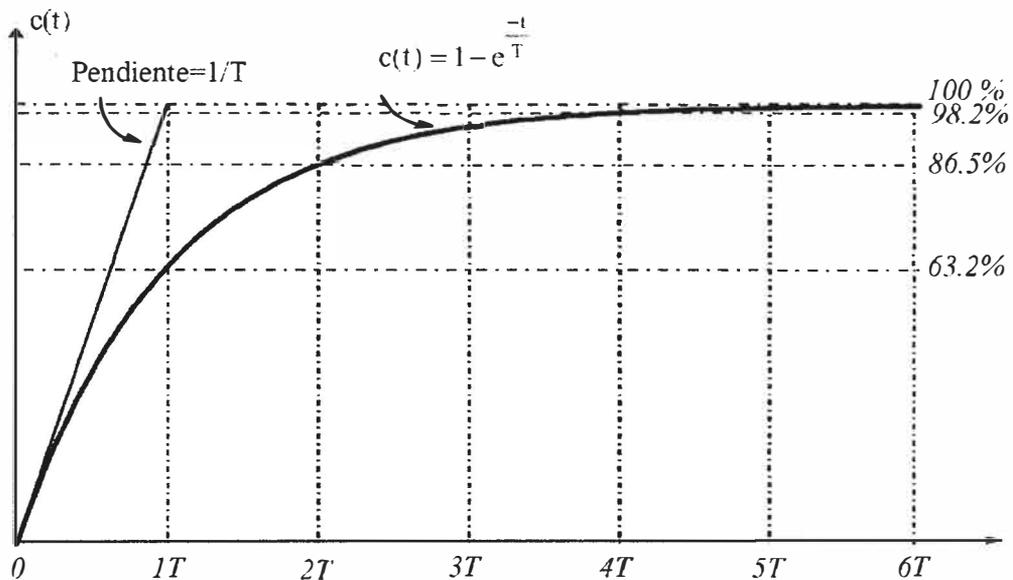


Fig. 1.34 Respuesta al escalón

Observando la gráfica se comprueba que para $t = T$ la señal de salida ha alcanzado el 63.2 % del valor final, siendo esta una medida típica en la caracterización de sistemas de primer orden.

A efectos prácticos, se considera que cuando han transcurrido por lo menos cuatro constantes de tiempo, la señal de salida ha alcanzado el valor final.

$$t = 4T \rightarrow c(t) \cong c_{ss}(t) \approx 1 \quad (1.33)$$

De este modo se deduce que, cuanto más pequeña es la constante de tiempo de un sistema de primer orden más rápidamente alcanza el valor final.

Sistemas de segundo orden.

Un sistema de segundo orden se caracteriza por poseer dos polos en su función de transferencia. Expresión normalizada:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1.34)$$

donde se define:

ξ = Relación de amortiguamiento.

ω_n = Frecuencia natural no amortiguada.

Los polos de un sistema de segundo orden vienen determinados por la expresión:

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1} \quad (1.35)$$

- Tipos de sistemas en función del valor de ξ :

En la siguiente gráfica se visualiza la ubicación de polos de la función de transferencia en función del valor de ξ .

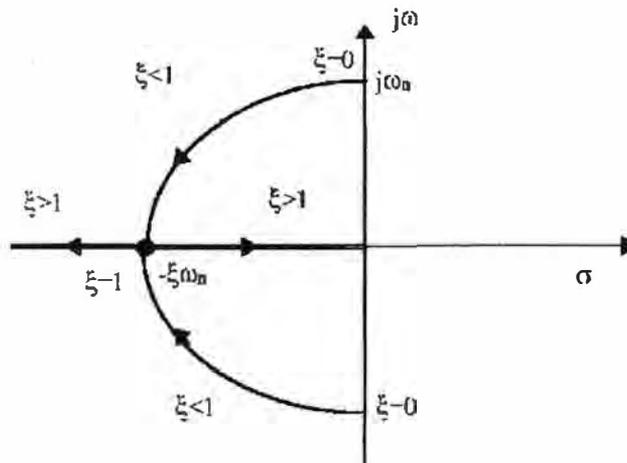


Fig. 1.35. Diagrama de la ubicación de los polos

Para $\xi = 0$ = Sistema oscilatorio. $s_{1,2} = \pm j\omega_n$

Para $0 < \xi < 1$ = Sistema subamortiguado

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi^2} = -\sigma \pm j\omega_d$$

Para $\xi = 1$ = Sistema con amortiguamiento Crítico. $s_{1,2} = -\omega_n$

Para $\xi > 1$ = Sistema sobreamortiguado.

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1}$$

- Respuesta al escalón en un sistema subamortiguado ($0 < \xi < 1$):

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \cdot \frac{1}{s} \xrightarrow{\text{TL}^{-1}} c(t) = 1 - e^{-\xi\omega_n t} \left[\cos(\omega_d \cdot t) + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \text{sen}(\omega_d \cdot t) \right]; t \geq 0 \quad (2.1)$$

$$c(t) = 1 - e^{-\xi\omega_n t} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \text{sen} \left[\omega_d \cdot t + \text{tg}^{-1} \left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} \right) \right] = 1 - e^{-\xi\omega_n t} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \text{sen}[\omega_d \cdot t + \theta]; t \geq 0 \quad (2.2)$$

donde:

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} \right),$$

con lo cual θ es el ángulo que forma el polo respecto al origen; de hecho puede expresarse: $\xi = \cos(\theta)$. En conclusión, a medida que θ aumenta la relación de amortiguamiento disminuye.

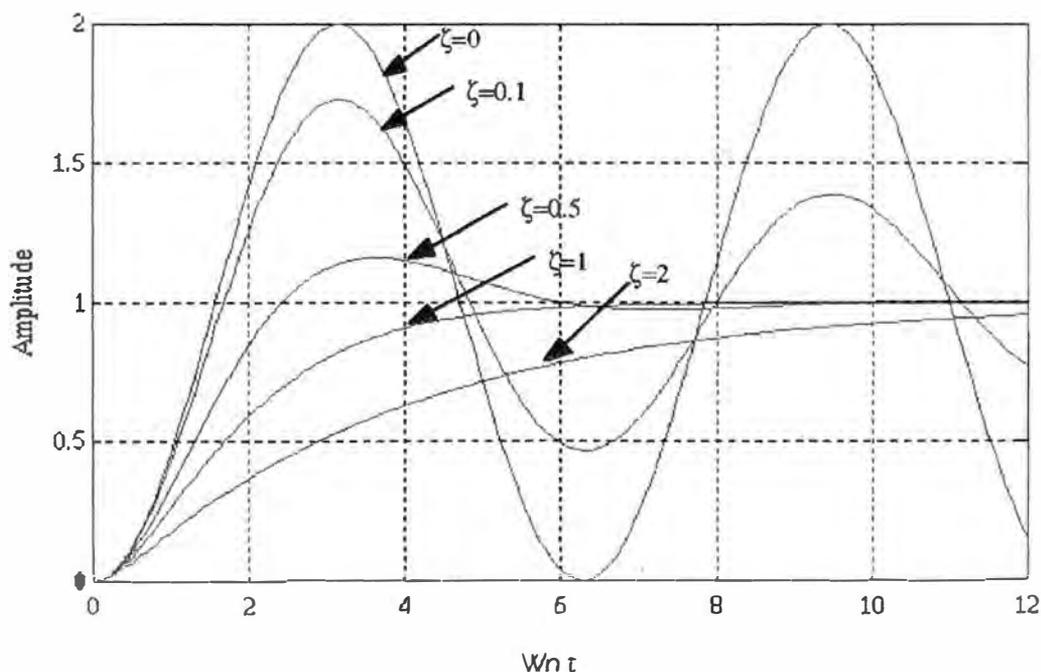


Fig. 1.36. Respuesta al escalón de un sistema de segundo orden

El control discreto es caracterizado a través de su función de transferencia en Z y es diseñado para cumplir las especificaciones requeridas al sistema.

Se define el sistema continuo equivalente de un sistema discreto como aquel sistema que resulta de eliminar los muestreadores y mantenedores de datos del sistema discreto.

Las respuestas temporales del sistema discreto y del sistema continuo equivalente difieren substancialmente a medida que aumenta el periodo de muestreo, de este modo se dice que el muestreo desvirtúa la respuesta del sistema discreto frente a la del sistema continuo equivalente. En concreto, el muestreo tiene un efecto desestabilizador del sistema, de manera que, cuanto más desvirtuado se halla el sistema discreto frente al sistema analógico, "peor" es su respuesta transitoria. Este efecto conlleva una pérdida de la estabilidad relativa del sistema discreto a medida que aumenta el periodo de muestreo.

Ejemplo:

Dado los siguientes sistemas:

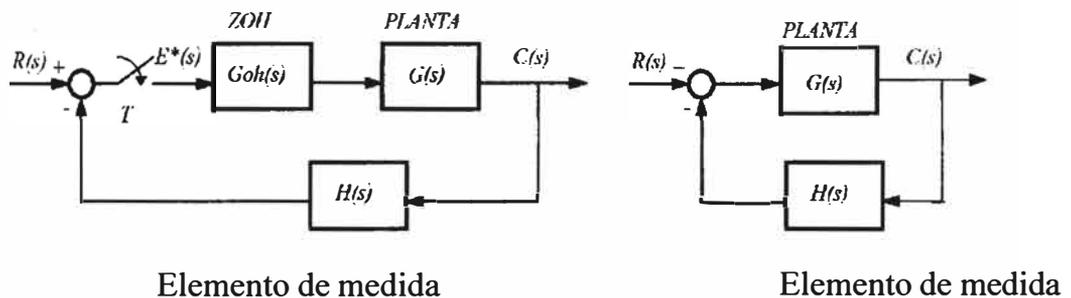


Fig. 1.37. a) Sistema discreto b) Sistema continuo equivalente

Con las siguientes funciones de transferencias:

$$G(s) = \frac{1}{s(s+1)} ; H(s) = 1$$

Los parámetros de medida de este proceso son, fundamentalmente, dos:

- Número de muestras por constante de tiempo:

Corresponde a la expresión: t/T . Se considera que si se poseen más de 5 muestras por constante de tiempo de la respuesta del sistema discreto no queda desvirtuada frente a la respuesta del sistema continuo equivalente. Obsérvese que t es la constante de tiempo más pequeña del sistema continuo equivalente.

- Número de muestras por ciclo:

Corresponde a la expresión: T_d/T . En este caso no existe ningún criterio al respecto, pero se considera que son suficientes 10 muestras por ciclo para poder decir que la respuesta no queda desvirtuada.

Se puede observar el efecto desestabilizador al aumentar el periodo de muestreo en las siguientes gráficas

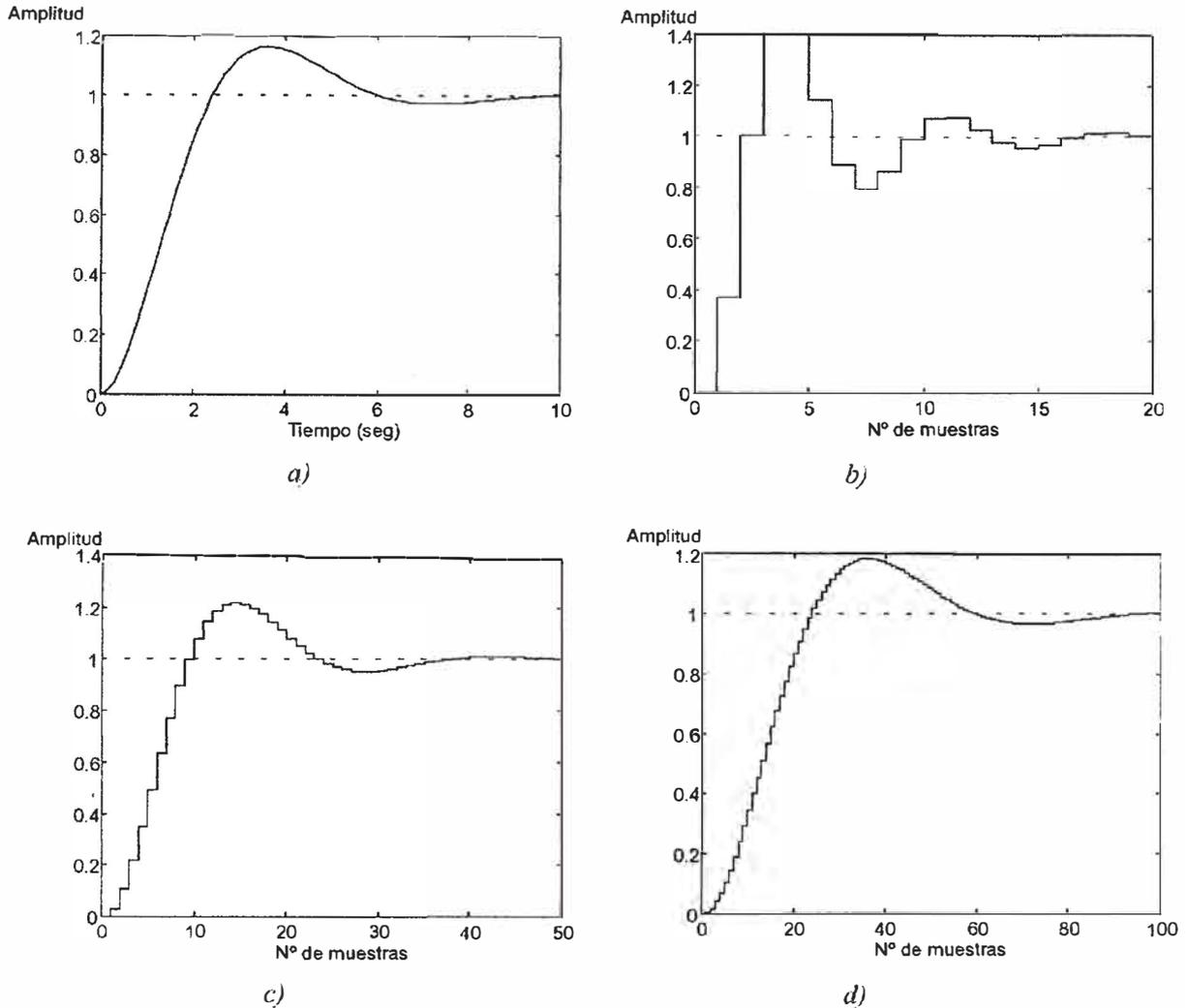


Fig. 1.38

- a) Respuesta al escalón del sistema equivalente.
- b) Respuesta al escalón del sistema discreto con $T = 1$ seg.
- c) Respuesta al escalón del sistema discreto con $T = 0.25$ seg.
- d) Respuesta al escalón del sistema discreto con $T = 0.1$ seg.

1.13 Estabilidad absoluta de sistemas lineales.

1.13.1 Estabilidad en sistemas de tiempo continuo.

Se ha comentado anteriormente que la estabilidad absoluta de un sistema lineal se logra cuando la respuesta transitoria decae a cero al tender el tiempo a infinito. Se puede demostrar que para que un sistema lineal sea estable es necesario que posea todos los polos de su función de transferencia en el semiplano izquierdo del plano transformado S .

En sistemas de control, el problema fundamental es la determinación de las raíces del sistema en Lazo Cerrado a partir del conocimiento de las raíces en Lazo Abierto. Recordando la expresión de la función de transferencia en Lazo Cerrado.

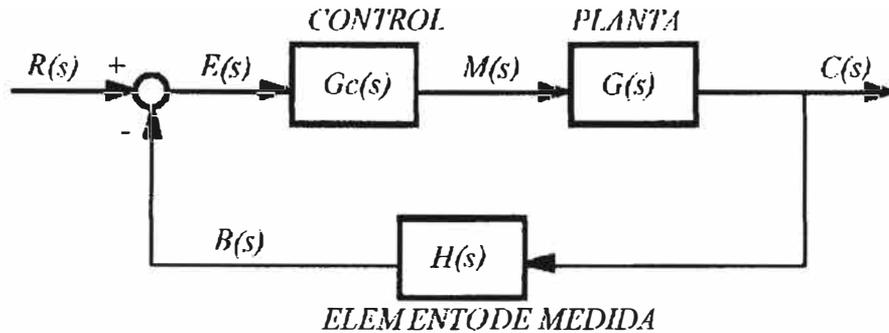


Fig. 1.39 Estructura de un sistema de control en lazo cerrado

$$G_{LC}(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s) \cdot G(s)}{1 + G_c(s) \cdot G(s) \cdot H(s)}$$

La ecuación característica del sistema en Lazo Cerrado $1 + G_c(s)G(s)H(s) = 0$ no es fácilmente resoluble en general; por ello aparecen métodos algorítmicos para poder determinar la estabilidad de un sistema en lazo cerrado, el más importante de estos métodos es el criterio de estabilidad de Routh (CER).

El criterio de estabilidad de Routh permite determinar el número de raíces de una ecuación de variable compleja que se encuentran en el semiplano derecho, utilizándose, de este modo, para determinar si existen polos de una función de transferencia en el semiplano derecho del plano transformado S.

Criterio de estabilidad de Routh (CER):

El criterio de estabilidad de Routh es un criterio de estabilidad absoluta. Se basa en la determinación del número de raíces de un polinomio que se encuentran en el semiplano derecho del plano S. Para su aplicación deben verificarse dos condiciones:

- Condición necesaria:

Dada la función de transferencia:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_0 \cdot s^m + b_1 \cdot s^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 \cdot s^n + a_1 \cdot s^{n-1} + \dots + a_n}$$

Debe escribirse el denominador de la forma: $a_0 \cdot s^n + a_1 \cdot s^{n-1} + \dots + a_n = 0$, con $a_n \neq 0$ (se eliminan las raíces en el eje imaginario). Criterio: Si existe algún coeficiente negativo o cero en presencia de algún coeficiente positivo, entonces existen una o más raíces imaginarias puras o con parte real positiva, lo cual implica que el sistema es inestable. En otros términos, para garantizar estabilidad, a partir del primer $a_i \neq 0$ todos los coeficientes deben estar presentes y ser positivos.

- Condición suficiente:

Debe aplicarse el algoritmo de formación siguiente: $a_0 \cdot s^n + a_1 \cdot s^{n-1} + \dots + a_n = 0$.

s^n	a_0	a_2	a_4	a_6	\dots
s^{n-1}	a_1	a_3	a_5	a_7	\dots
s^{n-2}	b_1	b_2	b_3	b_4	\dots
s^{n-3}	c_1	c_2	c_3	c_4	\dots
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\dots
s^2	e_1	e_2			
s^1	f_1				
s^0	g_1				

Las primeras filas se obtienen directamente del polinomio característico, el resto de coeficientes se obtienen según las expresiones:

$$b_1 = \frac{a_1 \cdot a_2 - a_0 \cdot a_3}{a_1}; \quad b_2 = \frac{a_1 \cdot a_4 - a_0 \cdot a_5}{a_1}; \quad b_3 = \frac{a_1 \cdot a_6 - a_0 \cdot a_7}{a_1}$$

$$c_1 = \frac{b_1 \cdot a_3 - a_1 \cdot b_2}{b_1}; \quad c_2 = \frac{b_1 \cdot a_5 - a_1 \cdot b_3}{b_1}; \quad c_3 = \frac{b_1 \cdot a_7 - a_1 \cdot b_4}{b_1}$$

Como observación debe indicarse que puede multiplicarse o dividirse toda una fila por una constante positiva.

El criterio de estabilidad de Routh determina que el número de raíces con parte real positiva del polinomio estudiado es igual al número de cambios de signo de la primera columna del algoritmo de formación.

De este modo la condición necesaria y suficiente para que un sistema sea estable es:

- Todos los coeficientes del polinomio característico deben existir y ser positivos.
- Todos los coeficientes de la primera columna del algoritmo de formación deben de ser positivos.

1.13.2 Estabilidad en sistemas de tiempo discreto.

Se puede demostrar que un sistema discreto es estable cuando posee todos los polos de su función de transferencia en el interior del círculo de radio unidad en el plano transformado Z.

La función de transferencia del sistema de control discreto de la figura se puede expresar:

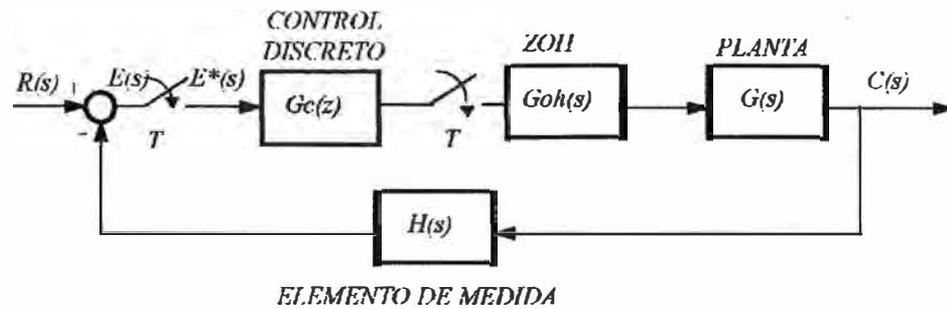


Fig. 1.40 Diagrama de bloques de sistema de control discreto en lazo cerrado

$$G_{T.C}(z) = \frac{C(z)}{R(z)} = \frac{G_c(z) \cdot G_{oh}G(z)}{1 + G_c(z) \cdot G_{oh}GH(z)}$$

donde la ecuación característica del sistema en lazo cerrado $1 + G_c(z)G_{oh}GH(z) = 0$ no es fácilmente resoluble y deben buscarse métodos transformados para poder determinar la posición de sus raíces.

En este caso, la aplicación directa del criterio de estabilidad de Routh no es útil, porque determina el número de raíces de la ecuación característica que se encuentran en semiplano derecho y no en el exterior del círculo de radio unidad. Sin embargo, sí es posible aplicar el CER tras una transformación que convierta el interior y el exterior del círculo de radio unidad en un semiplano izquierdo y un semiplano derecho respectivamente; a esta transformación se le denomina transformación bilineal.

Transformación bilineal.

La definición de la transformación bilineal no es única; sin embargo, la más conocida se realiza mediante el cambio de variable:

$$z = \frac{1 + \frac{T}{2}w}{1 - \frac{T}{2}w}; \quad w = \frac{2}{T} \cdot \frac{z - 1}{z + 1}.$$

La transformación del círculo de radio unidad ofrece el resultado:

$$w = \frac{2}{T} \cdot \frac{z - 1}{z + 1} = \frac{2}{T} \cdot \frac{e^{j\omega T} - 1}{e^{j\omega T} + 1} = j \frac{2}{T} \cdot \frac{\text{sen}\left(\frac{\omega T}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\omega T}{2}\right)}$$

$$w = j \frac{2}{T} \cdot \text{tg}\left(\frac{\omega T}{2}\right)$$

que, efectivamente, corresponde con el eje imaginario del plano transformado W.

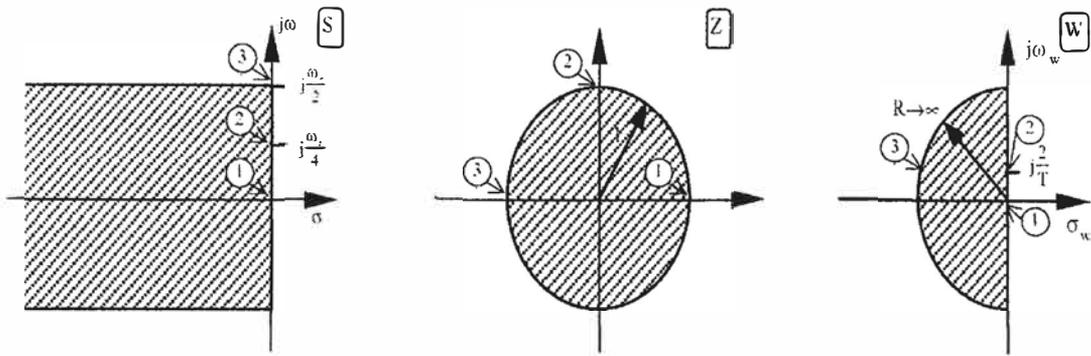


Fig. 1.41 Relación entre los planos S, Z y W

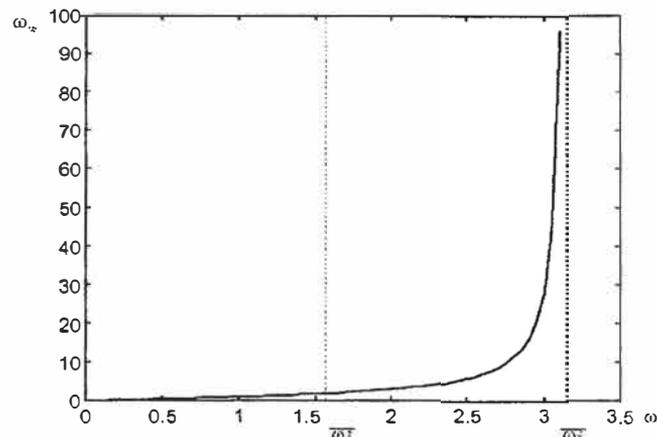


Fig. 1.42 Relación entre los ejes imaginarios del plano S y el plano W

En conclusión, el círculo de radio unidad del plano Z se transforma, mediante la transformada bilineal, en el eje imaginario del plano W, de manera que puede aplicarse en dicho plano el criterio de estabilidad de Routh para determinar la estabilidad de un sistema discreto.

Análisis en régimen estacionario.

Un sistema lineal estable alcanza el régimen o estado estacionario cuando, al ser excitado por una señal de entrada, la respuesta transitoria decae a cero.

En sistemas de control, la precisión o exactitud del sistema se convierte en una de las especificaciones más importantes que verificar; el sistema de control debe 'seguir' la señal de referencia en estado estacionario del modo más preciso posible. Por esta razón, en sistemas de control en lazo cerrado se obtienen las expresiones de los errores estacionarios del sistema en función del tipo de señal de referencia introducida y de las funciones de transferencia que contiene.

Analizando el diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado se obtiene la señal de error como:

$$E(s) = \frac{R(s)}{1 + GLA(s)}$$

Se define el error en estado estacionario:

$$e_{ss} \equiv \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot E(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s \cdot R(s)}{1 + GLA(s)}$$

Particularizando para los diversos tipos de entradas: * Error estacionario de posición:

$$r(t) = u(t) \rightarrow e_{ssp} = \frac{1}{1 + k_p}$$

$$k_p = \lim_{s \rightarrow 0} GLA(s) \rightarrow$$

coeficiente de posición.

* Error estacionario de velocidad:

$$r(t) = t \rightarrow e_{ssv} = \frac{1}{k_v}$$

$$k_v = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot GLA(s) \rightarrow$$

coeficiente de velocidad.

* Error estacionario de aceleración:

$$r(t) = \frac{t^2}{2} \rightarrow e_{ssa} = \frac{1}{k_a}$$

$$k_a = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 \cdot GLA(s) \rightarrow$$

coeficiente de aceleración.

Obsérvese que, cuando mayores son los coeficientes de error, menor es el error estacionario correspondiente cometido. El error en estado estacionario en lazo cerrado puede obtenerse a partir de la función de transferencia en lazo abierto, de modo que, cuanto mayor es su valor en continua (para frecuencia cero) menor es el error cometido. Para poder eliminar el error de posición es necesario que la función de transferencia en lazo abierto contenga un polo en origen; en este caso se dice que existe un elemento integrador en dicha función.

Por último, señalar que este error estacionario no es más que el valor que adquiere la señal de salida del detector de error en estado estacionario. En el caso en el cual la realimentación fuese unitaria, coincidiría con la diferencia que se tendría en estado estacionario entre la señal de referencia y la señal de salida del sistema. Si la

realimentación no es unitaria, existirá un factor de proporcionalidad entre ambas señales que vendrá determinado por el elemento de medida.

Las expresiones de los errores estacionarios de un sistema de control discreto en lazo cerrado son:

Análogamente al caso anterior: Señal de error:

$$E(z) = \frac{R(z)}{1 + G_{LA}(z)}$$

Error en estado estacionario:

$$e_{ss} \equiv \lim_{k \rightarrow \infty} e(kT) = \lim_{z \rightarrow 1} (1 - z^{-1}) \cdot E(z) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{(1 - z^{-1}) \cdot R(z)}{1 + G_{LA}(z)}$$

* Error estacionario de posición:

$$r(t) = u(t) \rightarrow e_{ssp} = \frac{1}{1 + k_p}$$

* Error estacionario de velocidad:

$$r(t) = t \rightarrow e_{ssv} = \frac{1}{k_v}$$

$$k_v = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{1} \cdot G_{LA}(z) \rightarrow$$

coeficiente de velocidad.

* Error estacionario de aceleración:

$$r(t) = \frac{t^2}{2} \rightarrow e_{ssa} = \frac{1}{k_a}$$

$$k_a = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{(z-1)^2}{1^2} \cdot G_{LA}(z) \rightarrow$$

coeficiente de aceleración.

CAPITULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2. Medición Tradicional en la medición de pH.

Las mediciones del pH en el PERU se realizan usando dos métodos:

2.1. Primer método:

Usando el Papel Tornasol

Para este método se siguen los siguientes pasos:

1. Se toma la muestra de la solución que se va a medir el pH, normalmente la muestra la toman a través de una llave que sirven para este fin.
2. La muestra se vierte sobre un recipiente de acero(Al realizar este proceso se están cambiando las condiciones de la solución)
3. Se lleva la muestra al laboratorio que en promedio se encuentra a 150 metros del punto de medición)
4. Se usa un gotero para colocar la solución sobre el papel de tornasol.
5. La solución reacciona sobre el papel de tornasol, ocasionando un cambio de Color. (Este color define el pH de la muestra)
6. Según el valor obtenido se realiza la neutralización manual de la solución para poder obtener el valor del pH deseado (agrega neutralizante).

2.2. Segundo Método

Usando el Medidor Portátil

Para este método se siguen los siguientes pasos:

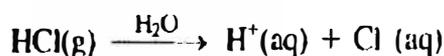
1. Se toma la muestra de la solución que se va a medir el pH, normalmente la muestra la toman a través de una válvula que sirve para este fin.
2. La muestra se vierte sobre un recipiente de acero(Al realizar este proceso se están cambiando las condiciones de la solución)
3. Se lleva la muestra al laboratorio que en promedio se encuentra a 150 metros del punto de medición)
4. El medidor portátil se sumerge sobre el recipiente que contiene la muestra.

5. Luego de 30 segundos estabilizada la muestra se muestra el valor del pH en la pantalla del medidor portátil.
6. Según el valor obtenido se realiza la neutralización manual de la solución para poder obtener el valor del pH deseado (agrega neutralizante).

CAPITULO III: ASPECTOS TEÓRICOS DE LA MEDICIÓN DEL pH

3.1 Ácidos y Bases.- Teoría de Arrhenius

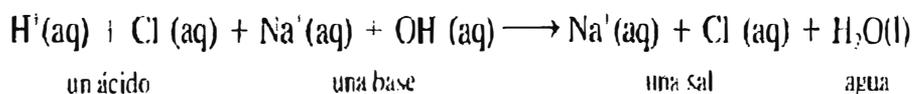
Algunos aspectos del comportamiento de los ácidos y las bases pueden explicarse de forma adecuada con la teoría desarrollada por Arrhenius, como parte de su estudio sobre la disociación electrolítica. Arrhenius propuso que un electrolito fuerte en una disolución acuosa existe sólo en forma iónica, mientras que un electrolito débil existe parcialmente como iones y como moléculas. Cuando se disuelve en agua el ácido HCl, sus moléculas se disocian por completo, formándose iones H^+ como uno de los productos.



Cuando se disuelve en agua la base NaOH, los iones Na^+ y OH^- presentes en el sólido se disocian uno de otro por la acción de las moléculas de H_2O



La reacción de neutralización del ácido HCl y la base NaOH se puede representar con la ecuación iónica



La Ecuación representa una idea fundamental de la teoría de Arrhenius: una reacción de neutralización consiste en la combinación de iones hidrógeno e iones hidróxido para formar agua.

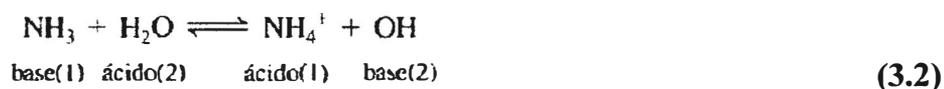
3.2 Teoría de ácidos y bases de Bronsted-Lowry

En 1923, J. N. Bronsted en Dinamarca y T. M. Lowry en Gran Bretaña propusieron de forma independiente una nueva teoría ácido-base. En esta teoría, un ácido es un dador de protones y una base es un aceptor de protones. Para describir el comportamiento del amoníaco como base, que era difícil con la teoría de Arrhenius, podemos escribir.

En la reacción (3.2) el H₂O actúa como un *ácido*. Cede un protón, H⁺, que es ganado por el NH₃, una base. Como resultado de esta transferencia se forman los iones poliatómicos NH₄⁺ y OH⁻, los mismos iones que se producen en la ionización del hipotético NH₄OH de la teoría de Arrhenius. Como el NH₃(aq) es una base débil, deberíamos considerar la reacción *inversa* de la (3.2.2). En esta reacción inversa el NH₄⁺ es un ácido y el OH⁻ una base.



La forma convencional de representar una reacción reversible es utilizar la notación de la doble flecha. También podemos poner los nombres "ácido" y "base" debajo de las cuatro especies químicas de la reacción.



Nombramos a la pareja NH₃/NH₄⁺ con "(1)" y a la pareja H₂O/OH⁻ con "(2)". Cada combinación se denomina par conjugado. Una molécula de NH₃ actúa como base aceptando un protón, y un ion NH₄⁺ es el **ácido conjugado** del NH₃. De forma semejante, en la reacción (3.2.2) el H₂O es un ácido y el ion OH⁻ es su **base** conjugada. La Figura 3.2 describe la transferencia del protón implicado en las reacciones directa e inversa.

$$K_c = \frac{[\text{NH}_4^+][\text{OH}^-]}{[\text{NH}_3][\text{H}_2\text{O}]} \quad (3.3)$$

En el amoníaco en disolución acuosa, sin embargo, las moléculas de H₂O son tan superiores en número a las moléculas de NH₃ y a los iones NH₄⁺ y OH⁻ que el agua, es decir, el disolvente, es prácticamente un líquido puro con una actividad igual a la unidad.

Por esta razón, en la expresión de la constante de equilibrio no se encuentra el término [H₂O]

$$K_b = \frac{[\text{NH}_4^+][\text{OH}^-]}{[\text{NH}_3]} = 1,8 \times 10^{-5} \quad (3.4)$$

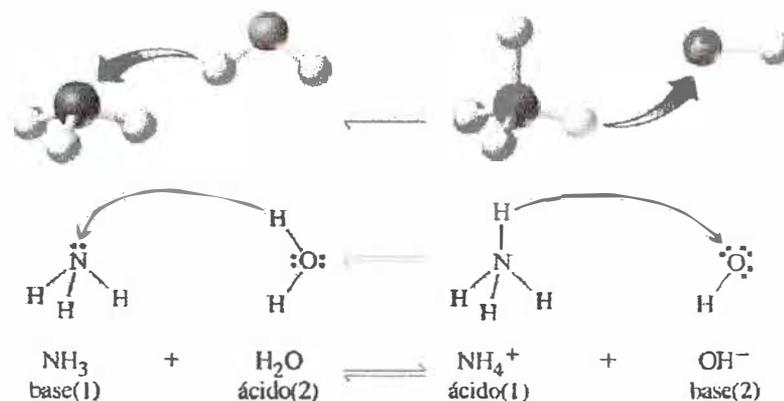


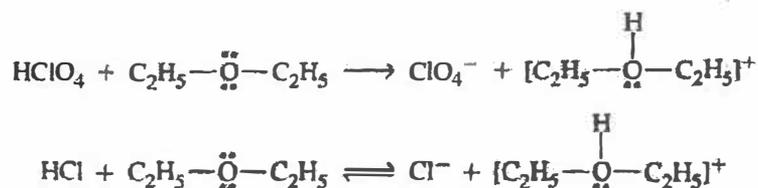
Fig. 3.1. Reacción ácido-base de Bronsted-Lowry: base débil

Las flechas representan la transferencia del protón en la reacción. Las flechas rojas representan la reacción hacia la derecha y las flechas azules, la reacción inversa. Como el NH_4^+ es un ácido más fuerte que el H_2O y el OH^- es una base más fuerte que el NH_3 , la reacción inversa se produce en mayor extensión que la reacción directa. Por tanto, el NH_3 sólo está ligeramente ionizado.

Ácido		Base conjugada	
Ácido perclórico	HClO_4	Ion perclorato	ClO_4^-
Ácido iodhídrico	HI	Ion ioduro	I^-
Ácido bromhídrico	HBr	Ion bromuro	Br^-
Ácido clorhídrico	HCl	Ion cloruro	Cl^-
Ácido sulfúrico	H_2SO_4	Ion hidrógeno sulfato	HSO_4^-
Ácido nítrico	HNO_3	Ion nitrato	NO_3^-
Ion hidronio ^a	H_3O^+	Agua ^a	H_2O
Ion hidrógeno sulfato	HSO_4^-	Ion sulfato	SO_4^{2-}
Ácido nitroso	HNO_2	Ion nitrito	NO_2^-
Ácido acético	$\text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2$	Ion acetato	$\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2^-$
Ácido carbónico	H_2CO_3	Ion hidrógeno carbonato	HCO_3^-
Ion amonio	NH_4^+	Amoníaco	NH_3
Ion hidrógeno carbonato	HCO_3^-	Ion carbonato	CO_3^{2-}
Agua	H_2O	Ion hidróxido	OH^-
Metanol	CH_3OH	Ion metóxido	CH_3O^-
Amoníaco	NH_3	Ion amiduro	NH_2^-

^a La combinación agua/ion hidronio indica la facilidad con que un protón pasa de una molécula de agua a otra: es decir, $\text{H}_3\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O} + \text{H}_3\text{O}^+$

Para determinar si el HClO_4 o el HCl es el ácido más fuerte, necesitamos utilizar un disolvente que sea una base más débil que el agua, un disolvente que acepte más rápidamente los protones del ácido más fuerte que del más débil. En el disolvente dietil éter, $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$, el HClO_4 está completamente ionizado pero el HCl sólo está parcialmente ionizado. Por tanto, el HClO_4 es un ácido más fuerte que el HCl .



(3.5)

3.3 La autoionización del agua y la escala de pH

El agua, incluso cuando es pura, contiene una concentración muy baja de iones que pueden detectarse en medidas de conductividad eléctrica muy precisas. Los iones se forman como resultado de la naturaleza anfiprótica del agua; algunas moléculas de agua ceden protones y otras aceptan protones. En la autoionización del agua, por cada molécula de H_2O que actúa como ácido, otra actúa como base, y se forman los iones hidronio (H_3O^+) e hidróxido (OH^-). La reacción es reversible y en la reacción inversa el ion H_3O^+ cede un protón al ion OH^- . De hecho, la reacción inversa es mucho más importante que la reacción directa. El equilibrio está muy desplazado hacia la izquierda. En la reacción (3.3) el ácido (1) y la base (2) son *mucho* más fuertes que el ácido (2) y la base (1).

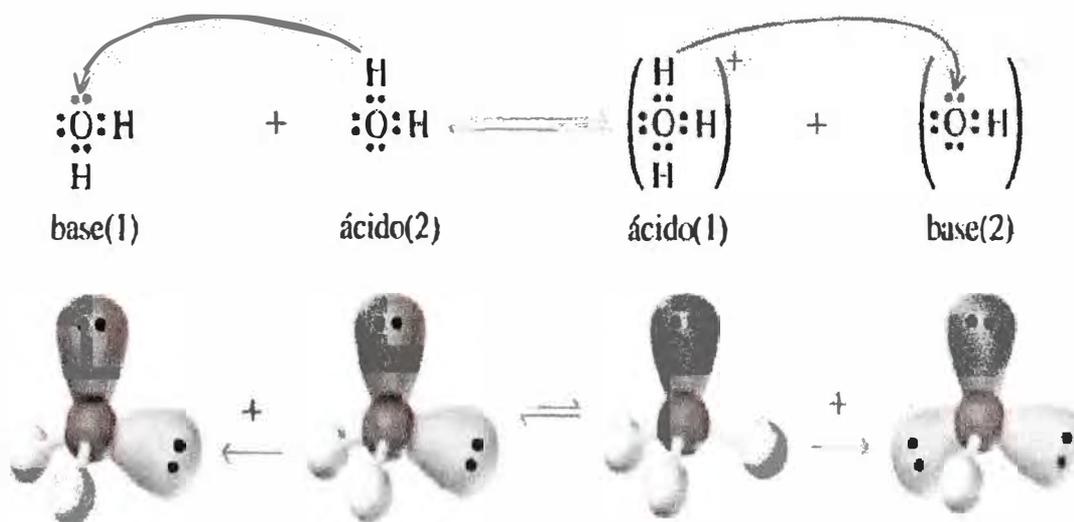


Fig. 3.2 Reacción

Siguiendo de nuevo el método que utilizamos al escribir las constantes de equilibrio para la ionización del NH_3 y $\text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2$, suponemos una actividad de 1 para las moléculas de H_2O y sustituimos las actividades de otras especies por sus molaridades. Para la autoionización del agua.



podemos escribir

$$K = [\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-]$$

La ecuación indica que $[H_3O^+]$ y $[OH^-]$ son iguales en agua pura. Hay varios métodos experimentales para determinar estas concentraciones y todos conducen al siguiente resultado.

$$\text{A } 25^\circ\text{C en agua pura: } [H_3O^+] = [OH^-] = 1,0 \times 10^{-7} \text{ M}$$

La constante de equilibrio para la autoionización del agua se denomina producto iónico del agua y su símbolo es K_w a 25°C ,

$$K_w = [H_3O^+][OH^-] = 1,0 \times 10^{-14}$$

$$K_w = [H_3O^+][OH^-] = 1,0 \times 10^{-14}$$

Puesto que K_w es una constante de equilibrio, el producto de la concentración de los iones hidronio e hidróxido debe ser siempre igual a 10^{-14} . Si aumentamos la concentración de H_3O^+ añadiendo un ácido, entonces la concentración de OH^- debe disminuir para mantener el valor de K_w . Si aumentamos la concentración de OH^- añadiendo una base, entonces la concentración de H_3O^+ debe disminuir. La ecuación relaciona las concentraciones de H_3O^+ y OH^- y se aplica a todas las disoluciones acuosas, no solamente al agua pura, como veremos a continuación.

En 1909, el bioquímico danés Søren Sørensen propuso el término pH para indicar el "potencial del ion hidrógeno". Definió el pH como el logaritmo de $[H^+]$ cambiado de signo. Redefinido en función de $[H_3O^+]$ *

$$\text{pH} = -\log[H_3O^+]$$

Así, en una disolución de HCl 0,0025 M,

$$[H_3O^+] = 2,5 \times 10^{-3} \text{ M} \quad \text{y} \quad \text{pH} = -\log(2,5 \times 10^{-3}) = 2.60$$

Para determinar la $[H_3O^+]$ que corresponde a un valor de pH determinado, hacemos el cálculo inverso. En una disolución con $\text{pH} = 4,50$,

$$\log[H_3O^+] = -4,50 \quad \text{y} \quad [H_3O^+] = 10^{-4,50} = 3.2 \times 10^{-5} \text{ M}$$

También podemos definir la magnitud pOH

$$\text{pOH} = -\log[OH^-]$$

Podemos obtener otra expresión útil tomando el logaritmo cambiado de signo de la expresión de K_w , que se ha indicado para 25°C , e introduciendo el símbolo $\text{p}K_w$.

$$K_w = [H_3O^+][OH^-] = 1,0 \times 10^{-14}$$

$$\log K_w = (\log [H_3O^+][OH^-]) = -\log(1,0 \times 10^{-14})$$

$$\text{p}K_w = -(\log [H_3O^+] + \log [OH^-]) = 14.00$$

$$pK_w = pH + pOH = 14.00$$

Una disolución acuosa con $[H_3O^+] = [OH^-]$ se dice que es *neutra*, en agua pura, a 25 °C, $[H_3O^+] = [OH^-] = 1,0 \times 10^{-7} M \Rightarrow pH = 7,00$. Así, todas las disoluciones acuosas a 25 °C con $pH = 7,00$ son neutras. Si el pH es menor de 7,00, la disolución es ácida; si el pH es mayor de 7,00, la disolución es básica o alcalina. La ecuación 3.3.1 establece la relación entre $[H_3O^+]$, $[OH^-]$, y K_w , en función de pH , pOH y pK_w . Si conocemos el valor de $[H_3O^+]$ o $[OH^-]$, podemos calcular el valor de los demás. Veamos el siguiente gráfico.

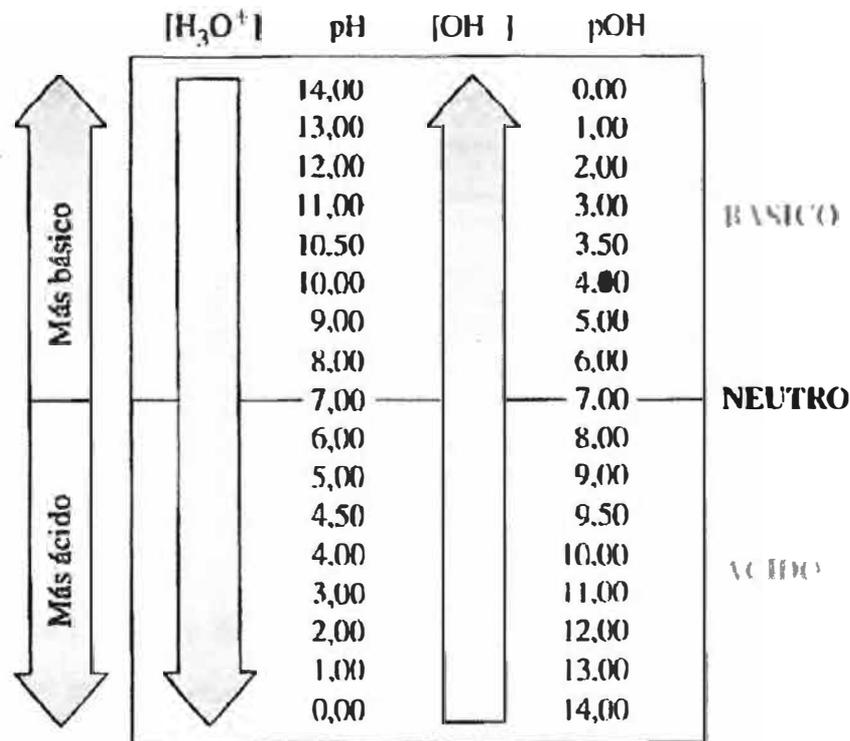


Figura 3.3. Relación entre $[H_3O^+]$, pH , $[OH^-]$, y pOH

En disolución acuosa, la suma de los valores de pH y pOH siempre da $pK_w = 14$ debido al equilibrio de autoionización del agua.

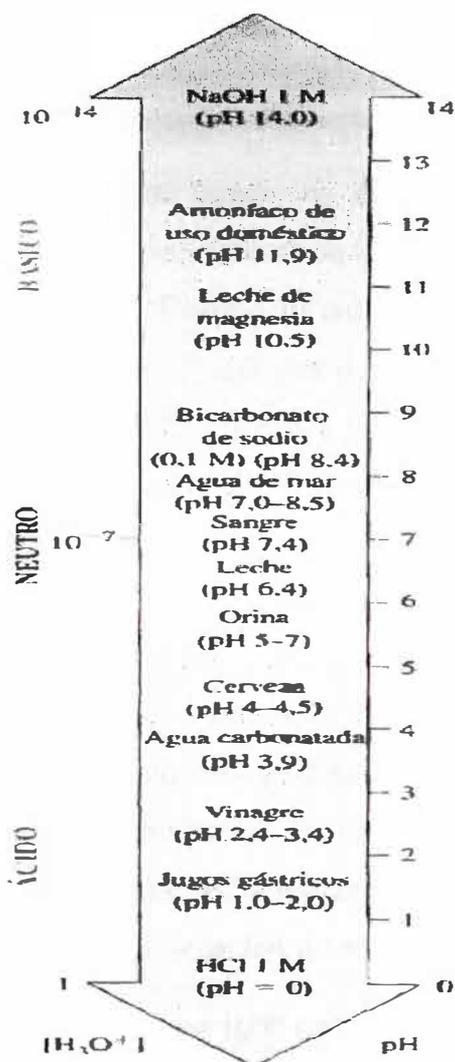


Fig. 3.4 La escala de pH y valores de pH para algunas disoluciones

La escala que se muestra aquí comprende el intervalo de pH de 0 a 14. También son posibles valores un poco negativos de pH, quizás hasta aproximadamente 15 (correspondientes a $a[\text{H}_3\text{O}^+]$ de 10 M). También son posibles valores de pH hasta aproximadamente 15 (correspondientes a $[\text{OH}^-]$ de 10 M). Sin embargo, desde un punto de vista práctico, la escala de pH es útil únicamente en el intervalo $2 < \text{pH} < 12$. Esto es debido a que en los ácidos y las bases concentrados, las molaridades de H_3O^+ y OH^- pueden diferir bastante de sus verdaderas actividades.

3.4 Ácidos fuertes y bases fuertes

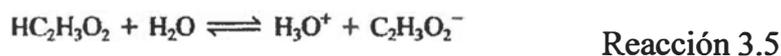
Como vimos, la ionización del HCl en disolución acuosa diluida se produce prácticamente por completo. Por el contrario, se sugiere que la autoionización del agua se produce en una extensión muy pequeña. Como resultado se puede deducir que al calcular $[\text{H}_3\text{O}^+]$ en una disolución acuosa de un ácido fuerte, la única fuente significativa de H_3O^+ es

el ácido fuerte. La contribución de la autoionización del agua puede despreciarse *a menos que la disolución sea* muy diluida.

3.5 Ácidos débiles y bases débiles

A continuación se ilustran dos formas de comprobar que se ha producido la ionización en una disolución acuosa de un ácido: una es por el color de un indicador ácido-base y la otra por la respuesta de un pH-metro. El color rosa de la disolución en la Figura 17.7a indica que el pH del HCl 0,10 M. El pH-metro registra un valor de 1,0, justo lo que se espera para una disolución de un ácido fuerte con $[H_3O^+] = 0,10$ M. El color amarillo de la disolución de la Figura 17.7b indica que el pH del $HC_2H_3O_2$ 0,10 M (ácido acético) es 2,8 o mayor. El pH-metro indica 2,8.

Así se ve que dos ácidos pueden tener molaridades idénticas pero diferentes valores de pH. La molaridad de un ácido indica simplemente que se puso esta cantidad en la disolución, pero $[H_3O^+]$ y el pH dependen de lo que sucede en la disolución. En las dos disoluciones se produce la autoionización del agua pero ésta es despreciable. La ionización del HCl, un ácido fuerte, puede suponerse que se produce de forma completa, como indica la Ecuación (17.5). Como ya se ha indicado previamente, la ionización del $HC_2H_3O_2$, un ácido débil, es una reacción reversible que alcanza una situación de equilibrio.



El color del indicador azul de ti mol, que está presente en ambas disoluciones, depende del pH de la disolución.

pH < 1,2 < pH < 2,8 < pH
rojo naranja amarillo

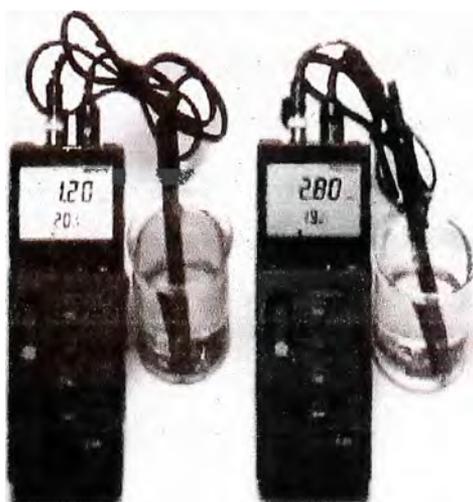


Fig. 3.5. Comparación entre ácidos fuertes y débiles

El fundamento del pH-metro se discutirá en la Sección 21.4. A la izquierda, una disolución de HCl 10^{-5} M con pH ≈ 1 . A la derecha, una disolución de $\text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2$ 10^{-5} M con pH $\approx 2,8$.

La expresión de la constante de equilibrio para la reacción (3.5) es

$$K_a = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2^-]}{[\text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2]} = 1,8 \times 10^{-5}$$

De la misma manera que el pH es una forma abreviada de designar $-\log[\text{H}_3\text{O}^+]$, el pK designa una constante de equilibrio. Es decir, $pK = -\log K$. Así para el ácido acético, $pK_a = -\log K_a = -\log(1,8 \times 10^{-5}) = -(4,74) = 4,74$

Igual que sucede con otras constantes de equilibrio, cuanto mayor es el valor de K , (o K_b para una base), mayor es el desplazamiento de la situación de equilibrio en el sentido directo de la reacción. Cuanto mayor es la ionización, mayores son las concentraciones de los iones producidos. Las constantes de ionización deben determinarse experimentalmente. En la Tabla se muestran algunos valores para ácidos débiles y bases débiles, y en el Apéndice D se encuentra una lista más extensa.

3.6 Identificación de ácidos y bases débiles

Un gran número de ácidos débiles tienen la misma característica estructural que el ácido acético: un grupo COOH como parte de la molécula. El *grupo carboxilo* es una característica común de muchos ácidos orgánicos, incluyendo los ácidos con importancia biológica, como el ácido láctico y los aminoácidos.

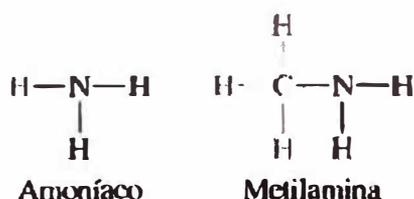
En general, para distinguir entre un ácido débil y un ácido fuerte, sólo se necesita recordar la media docena de ácidos fuertes que se encuentran en la continuación y que son los ácidos fuertes más comunes. A menos que se informe de lo contrario, puede suponer que cualquier ácido que no se encuentre en la Tabla es un ácido débil.

A primera vista, parece que las bases débiles son más difíciles de identificar que los ácidos débiles, ya que no hay un elemento característico como el H escrito al principio de la fórmula. Por otro lado, en la Tabla 3.6 se puede ver que todas las bases excepto una, la piridina, pueden considerarse como una molécula de amoníaco en la que se ha sustituido uno de los átomos de H por otro grupo (C_6H_5 , $-\text{C}_2\text{H}_5$, $-\text{OH}$, o $-\text{CH}_3$)

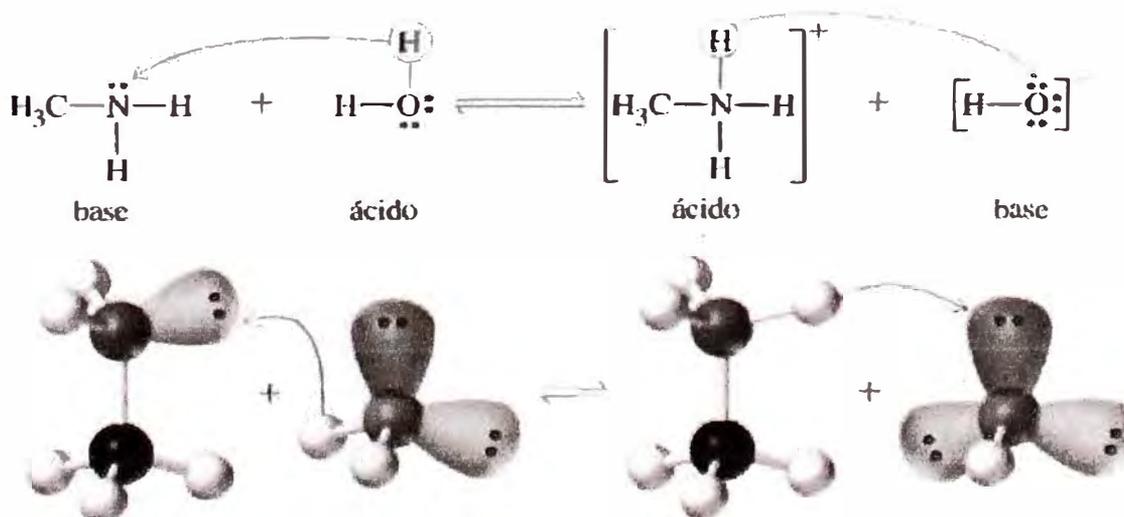
Equilibrio de ionización		Constante de ionización K	pK	
Ácido		$K_a =$	$pK_a =$	↑ Fuerza del ácido
Ácido iódico	$\text{HIO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{IO}_3^-$	$1,6 \times 10^{-1}$	0,80	
Ácido cloroso	$\text{HClO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{ClO}_2^-$	$1,1 \times 10^{-2}$	1,96	
Ácido cloroacético	$\text{HC}_2\text{H}_2\text{ClO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{C}_2\text{H}_2\text{ClO}_2^-$	$1,4 \times 10^{-3}$	2,85	
Ácido nitroso	$\text{HNO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{NO}_2^-$	$7,2 \times 10^{-4}$	3,14	
Ácido fluorhídrico	$\text{HF} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{F}^-$	$6,6 \times 10^{-4}$	3,18	
Ácido fórmico	$\text{HCHO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{CHO}_2^-$	$1,8 \times 10^{-4}$	3,74	
Ácido benzoico	$\text{HC}_7\text{H}_5\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{C}_7\text{H}_5\text{O}_2^-$	$6,3 \times 10^{-5}$	4,20	
Ácido hidrazoico	$\text{HN}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{N}_3^-$	$1,9 \times 10^{-5}$	4,72	
Ácido acético	$\text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2^-$	$1,8 \times 10^{-5}$	4,74	
Ácido hipocloroso	$\text{HOCl} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OCl}^-$	$2,9 \times 10^{-8}$	7,54	
Ácido cianhídrico	$\text{HCN} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{CN}^-$	$6,2 \times 10^{-10}$	9,21	
Fenol	$\text{HOC}_6\text{H}_5 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{C}_6\text{H}_5\text{O}^-$	$1,0 \times 10^{-10}$	10,00	
Peróxido de hidrógeno	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{HO}_2^-$	$1,8 \times 10^{-12}$	11,74	
Base		$K_b =$	$pK_b =$	↑ Fuerza de la base
Diethylamina	$(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{NH} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons (\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{NH}_2^+ + \text{OH}^-$	$6,9 \times 10^{-4}$	3,16	
Etilamina	$\text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_3^+ + \text{OH}^-$	$4,3 \times 10^{-4}$	3,37	
Amoníaco	$\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$	$1,8 \times 10^{-5}$	4,74	
Hydroxilamina	$\text{HONH}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HONH}_3^+ + \text{OH}^-$	$9,1 \times 10^{-9}$	8,04	
Piridina	$\text{C}_5\text{H}_5\text{N} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{C}_5\text{H}_5\text{NH}^+ + \text{OH}^-$	$1,5 \times 10^{-9}$	8,82	
Anilina	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_3^+ + \text{OH}^-$	$7,4 \times 10^{-10}$	9,13	

Tabla 3.6

La sustitución de un átomo de H por un grupo metilo, $-\text{CH}_3$ se indica en las siguientes fórmulas estructurales,



Se puede representar la ionización de la metilamina de la siguiente manera:



La expresión de la constante de ionización es

$$K_b = \frac{[\text{CH}_3\text{NH}_3^+][\text{OH}^-]}{[\text{CH}_3\text{NH}_2]} = 4,2 \times 10^{-4}$$

No todas las bases débiles contienen N, pero son tantas las que lo tienen que merece la pena recordar el comportamiento similar al amoníaco señalado aquí. Estas bases débiles derivadas del amoníaco se denominan aminas.

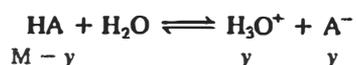
3.6.1 Cómo calcular el pH de una disolución muy diluida de un ácido débil?

Escriba dos ecuaciones que representen las fuentes de H_3O^+ , e indique las concentraciones de las diferentes especies en disolución.

Molaridad:



Molaridad:



El principal objetivo es determinar $[\text{H}_3\text{O}^+]$ en la disolución, que es $x + y$. A partir de $[\text{H}_3\text{O}^+]$, podremos obtener fácilmente el pH.

La primera tarea es resolver un sistema de dos ecuaciones en x e y . Las dos ecuaciones son

$$K_w = [\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-] = (x + y) \times x = 1,0 \times 10^{-14}$$

$$K_a = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{A}^-]}{[\text{HA}]} = \frac{(x + y) \times y}{(M - y)}$$

Observe los tres siguientes puntos en estas ecuaciones. (1) Puede haber sólo un valor de $[\text{H}_3\text{O}^+]$ en la disolución, que es $(x + y)$, que aparece en las dos ecuaciones. (2) La concentración estequiométrica del ácido es M , la molaridad, y la concentración de equilibrio es $[\text{HA}] = M - y$. El valor numérico de M depende de cada caso particular. (3) De forma semejante, el valor numérico de K_a depende de cada caso particular.

Obtenemos x a partir de la expresión de

$$x = \frac{K_a(M - y)}{y} - y \quad y \quad x + y = \frac{K_a(M - y)}{y}$$

Cuando sustituimos estos valores de x y $(x + y)$ en la ecuación de obtenemos

$$K_w = \frac{K_a(M - y)}{y} \times \left(\frac{K_a(M - y)}{y} - y \right) = 1,0 \times 10^{-14}$$

El valor de y que satisface esta ecuación no es difícil de obtener por el método de aproximaciones sucesivas que se ilustra en el Apéndice A.

Este pH parece realmente razonable para una disolución muy diluida de un ácido débil en agua, justo por debajo del pH neutro 7,00.

Finalmente, podemos utilizar los resultados de la discusión anterior para establecer un criterio a la hora de despreciar la autoionización del agua en los cálculos. Cuando hacemos esto, estamos suponiendo que $y \gg x$, de forma que $y \approx x + y$, y $yx \approx (x + y)x = [\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-] = K_w$. Además, si $y \gg x$, entonces $y^2 \gg K_w$. ¿Para qué valores de y podemos decir que $y \gg x$? Vamos a tomar el valor máximo de x consistente con la aproximación de despreciar la autoionización del agua, que es $1/100$ de y que, como se muestra a continuación significa que $[\text{H}_3\text{O}^+]$ debe ser mayor de 10^{-6} M.

$$y^2 > y \times x = y \times \frac{y}{10} = K_w = 1 \times 10^{-14}$$

$$y^2 > 1 \times 10^{-12} \quad y > 1 \times 10^{-6}$$

En los cálculos ácido-base, primero se deben aplicar las hipótesis simplificadoras, despreciar K_w y supone que $[\text{HA}]$ representa la molaridad del ácido. Después debe comprobarse que la respuesta $[\text{H}_3\text{O}^+]$ es mayor que 1×10^{-6} M y el criterio que se muestra en el siguiente apartado.

3.7 Estructura molecular y carácter ácido-base

Hasta ahora hemos tratado una serie de aspectos de la química ácido-base, tanto cualitativa como cuantitativamente. Todavía no se han contestado algunas cuestiones fundamentales, tales como: ¿por qué el HCl es un ácido fuerte mientras que el HF es un ácido débil?, ¿por qué el ácido acético (CH_3COOH) es un ácido más fuerte que el etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) pero más débil que el ácido cloroacético (ClCH_2COOH)?

Estas cuestiones implican la fuerza relativa de los ácidos, y en esta sección se examinará la relación entre la fuerza de los ácidos y las bases, y la estructura molecular.

3.7.1 Fuerza de los ácidos binarios

Como el comportamiento ácido requiere la pérdida de un protón por ruptura de enlace, es de esperar que la fuerza de los ácidos esté relacionada con la energía del enlace. Sin embargo, es una simplificación excesiva intentar relacionar la acidez de los ácidos binarios HX con la mera ruptura del enlace H - X. En principio, las energías de enlace se basan en la disociación de especies en fase gaseosa y aquí se trata de la disociación de especies en disolución. Sin embargo, parece razonable que cuanto más fuerte sea el enlace

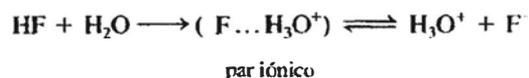
H—X, más débil debe ser el ácido y los enlaces fuertes están caracterizados por longitudes de enlace cortas y energías de disociación elevadas. Para los ácidos binarios de Grupo 17, las longitudes de enlace disminuyen y las energías de disociación de enlace aumentan en el siguiente orden

	HI		HBr		HCl		HF
<i>longitud de enlace:</i>	160,9	>	141,4	>	127,4	>	91,7 pm
<i>energía de disociación de enlace:</i>	297	<	368	<	431	<	569 kJ/mol

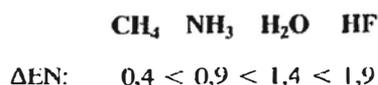
y la fuerza de los ácidos *disminuye* en el orden

$$K_a = \underbrace{10^9 > 10^8 > 1,3 \times 10^6}_{\text{fuerte}} > \underbrace{6,6 \times 10^{-4}}_{\text{débil}}$$

Es de esperar que el HF sea un ácido más débil que el resto de los haluros de hidrógeno, pero el que sea mucho más débil siempre se ha considerado una anomalía. La justificación de este comportamiento se centra en la tendencia del HF a formar enlaces de hidrógeno. Por ejemplo, en el HF(aq) los pares de iones se mantienen juntos mediante fuertes enlaces de hidrógeno, haciendo que la concentración de H_3O^+ libre no sea tan grande como cabría esperar.



Cuando se compara la fuerza de los ácidos binarios de un *período*, el factor determinante es la polaridad del enlace. Cuanto mayor es la diferencia de electronegatividad (AEN) en el enlace H-X, más polar es dicho enlace. Se podría esperar que la cesión de un H^+ a una base se produzca más fácilmente desde un enlace polar, donde ya existen las cargas iónicas parciales, que desde un enlace no polar.



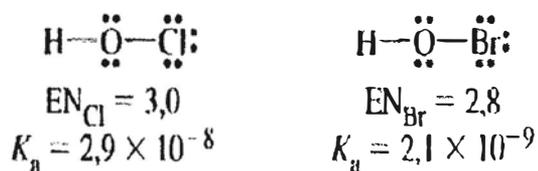
Los compuestos CH_4 y NH_3 no tienen propiedades ácidas en agua. La acidez del agua es muy limitada ($K_w = 1,0 \times 10^{-14}$), y el HF es un ácido de fuerza moderada ($K_{T_A} = 6,6 \times 10^{-4}$).

3.7.2 Fuerza de oxoácidos

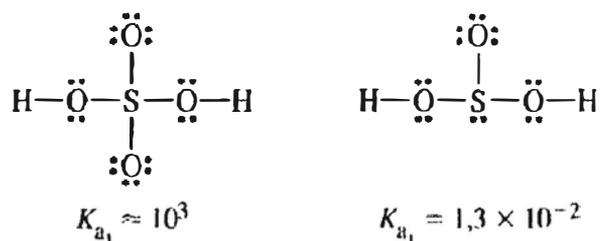
Para describir la fuerza relativa de los oxoácidos, necesitamos centrarnos en la atracción de los electrones del enlace O—H hacia el átomo central. La atracción por los electrones del enlace O—H está favorecida por los siguientes factores: (1) una

electronegatividad (EN) alta del átomo central y (2) un número elevado de átomos de O terminales en la molécula del ácido.

Ni la molécula de HOC1 ni la de HOBr tienen ningún átomo de O terminal. La mayor diferencia entre los dos ácidos es que el Cl es ligeramente más electronegativo que el Br. Como era de esperar, el HOC1 es más ácido que el HOBr.



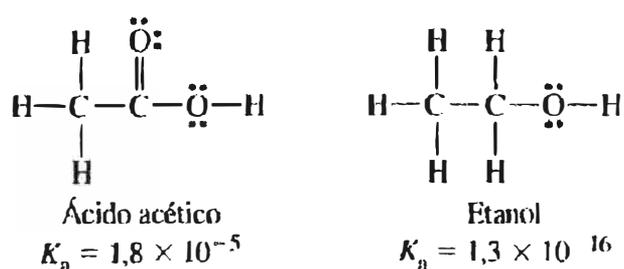
Para comparar la fuerza de los ácidos H_2SO_4 y H_2SO_3 , hay que considerar algo más que el átomo central, que es el S en los dos ácidos.



Podríamos esperar que un átomo de O terminal muy electronegativo tienda a atraer electrones de los enlaces O—H, debilitando los enlaces y aumentando la acidez de la molécula. Como el $\text{H}_2\text{S}<4$ tiene *dos* átomos de O terminales y el H_2SO_3 sólo tiene uno, es de esperar que el efecto de atracción de los electrones sea mayor en el H_2SO_4 . Como resultado, el H_2SO_4 debe ser un ácido más fuerte que el H_2SO_3 .

3.7.3 Fuerza de ácidos orgánicos

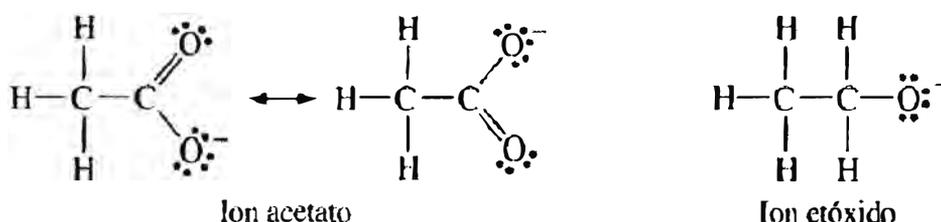
Terminaremos esta discusión sobre la relación entre la estructura molecular y la fuerza de un ácido con una breve consideración sobre los ácidos orgánicos. Primero considere el caso del etanol y el ácido acético. Ambos tienen un grupo O—H unido a un átomo de carbono, pero el ácido acético es un ácido mucho más fuerte que el etanol.



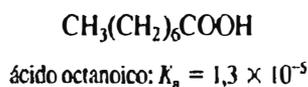
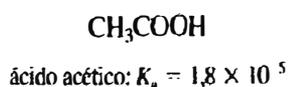
Para explicar la gran diferencia en la acidez de estos dos compuestos, podemos decir que la elevada electronegatividad del átomo de O terminal en el ácido acético atrae a los

electrones del enlace O—H. El enlace se debilita y cede un protón (H^+) más fácilmente a la base. El ácido acético es más ácido que el etanol. Hay otra explicación más satisfactoria que se centra en los aniones que se forman en la ionización.

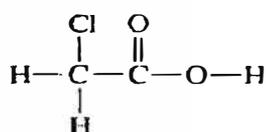
Podemos escribir dos estructuras aceptables para el ion aceta



Estas estructuras indican que cada enlace carbono-oxígeno es un enlace de orden " y cada átomo de O lleva " de la unidad de carga negativa. En resumen, la unidad de carga negativa de exceso en el CH_3COO^- se dispersa. Esta ordenación reduce la capacidad de los dos átomos de O de unirse a un protón y hace que el ion acetato sea solamente una base débil de Brønsted-Lowry. Por el contrario, en el ion etóxido, la unidad de carga negativa se localiza en un único átomo de O. El ion etóxido es una base mucho más fuerte que el ion acetato. Cuanto más fuerte sea la base conjugada, más débil es el ácido correspondiente. La longitud de la cadena de carbono en un ácido carboxílico tiene poco efecto sobre la fuerza del ácido, como se puede ver comparando el ácido acético y el octanoico.



Sin embargo, la fuerza del ácido puede estar muy afectada por otros átomos o grupos de átomos sustituidos en la cadena de carbono. Si en el ácido acético, sustituimos uno de los átomos de H unidos al carbono por un átomo de Cl, el resultado es el ácido cloroacético.



Ácido cloroacético

$K_a = 1,4 \times 10^{-3}$

El átomo de Cl, muy electronegativo, atrae los electrones del enlace O—H. Este enlace se debilita, el protón se pierde con más facilidad y este ácido es más fuerte que el

ácido acético. Este efecto disminuye rápidamente cuando aumenta la distancia entre el átomo o grupo atómico sustituido y el enlace O—H en un ácido orgánico.

A continuación ilustramos algunos de los factores que afectan a la fuerza de los ácidos, discutidos en esta sección.

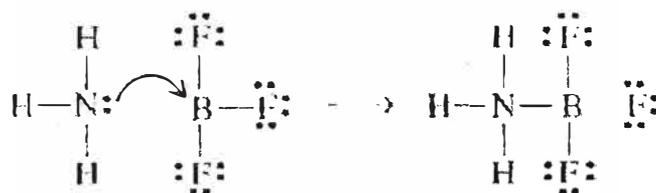
3.8 Ácidos y bases de Lewis

Un ácido de Lewis es una especie (un átomo, ion o molécula) que es un *aceptar* de pares de electrones, y una base de Lewis es una especie que es un dador de pares de electrones. Una reacción entre un ácido de Lewis (A) y una base de Lewis (H:) conduce a la formación de un enlace covalente entre ellos. El producto de una reacción ácido-base de Lewis se denomina un aducto (compuesto de adición). La reacción puede representarse como $B: + A \rightarrow B:A$

donde B:A es el aducto. La formación de un enlace químico covalente mediante una especie dadora de un par de electrones a otra se denomina coordinación y el enlace del ácido y la base de Lewis se denomina enlace covalente coordinado. En general, para identificar los ácidos de Lewis, deberíamos buscar especies con orbitales vacíos que puedan acomodar pares de electrones, y para las bases de Lewis, especies con pares de electrones solitarios disponibles para compartir.

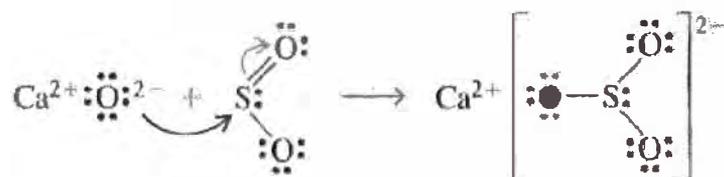
Según estas definiciones, el ion OH⁻, una base de Brønsted-Lowry, también es una base de Lewis debido a la presencia de pares solitarios de electrones sobre el átomo de O. Así también el NH₃ es una base de Lewis. Por otro lado, el HCl no es un ácido de Lewis: no es un aceptor de pares de electrones. Sin embargo, podemos considerar que el HCl produce H⁺ y el ion H⁺ sí es un ácido de Lewis, ya que forma un enlace covalente coordinado con un par de electrones disponible.

Se podría esperar que son ácidos de Lewis las sustancias con una capa de valencia incompleta. Cuando se forma un enlace covalente coordinado con una base de Lewis, se completa el octeto. Un buen ejemplo del octeto es la reacción entre el BF₃ y el NH₃.



La reacción de la cal (CaO) con dióxido de azufre es una reacción importante para la reducción de las emisiones de SO₂ de las centrales térmicas de carbón. Esta reacción entre un sólido y un gas pone de manifiesto que las reacciones ácido-base de Lewis pueden ocurrir

en todos los estados de la materia. La flecha roja curva pequeña en la reacción (3.8.1) sugiere que se reordena un par de electrones en la estructura de Lewis.



Una aplicación importante de la teoría ácido-base de Lewis implica la formación de *iones complejos*. Los iones complejos son iones poliatómicos que contienen un ion metálico central al que se unen otros iones o moléculas pequeñas. En disolución acuosa se forman los *iones* metálicos hidratados porque el agua actúa como una base de Lewis y el ion metálico como un ácido de Lewis. Las moléculas de agua se unen al ion metálico por medio de enlaces covalentes coordinados. Así, por ejemplo, cuando se añade AlCl_3 anhidro al agua la disolución resultante se calienta debido al calor desprendido en la formación del ion metálico hidratado $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$

La interacción entre el ion metálico y las moléculas de agua es tan fuerte que cuando la sal cristaliza en la disolución, las moléculas de agua cristalizan junto con el ion metálico formando la sal metálica hidratada $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. En disolución acuosa, los iones metálicos hidratados pueden actuar como ácidos de Bronsted.

Así el ion Al^{3+} , pequeño (53 pm de radio iónico) y con una carga elevada, produce disoluciones ácidas, pero el catión Na^+ , que es mayor (99 pm), con una carga de 1+. no aumenta la concentración de H_3O^+ . De hecho, ninguno de los cationes del Grupo I produce disoluciones de acidez apreciable y solamente el Be^{2+} y los elementos del Grupo 2 son suficientemente pequeños para que sus disoluciones sean ácidas (píT, = 5,4).

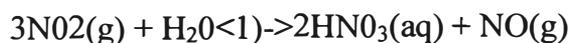


▲ A la izquierda, una estatua de mármol de George Washington tal como se encontraba en 1935. A la derecha, la misma estatua 59 años después. Los efectos de la lluvia ácida son evidentes.

El agua pura tiene pH — 7 pero no el agua de lluvia, que es acida. El pH natural del agua de lluvia debería ser aproximadamente 5,6. Sin embargo, en los últimos años, el agua que cae en el noreste de los Estados Unidos tiene un valor medio de 4,5. Se ha encontrado que a veces la lluvia tiene un pH más ácido todavía, y en una cierta ocasión, en 1982, en la costa oeste, el pH de la niebla fue 1,7. Vamos a considerar brevemente tanto las fuentes naturales de la acidez del agua de lluvia como la contribución de la actividad humana a la lluvia acida.

El agua de lluvia en equilibrio con el $\text{CO}_2(\text{g})$ atmosférico a su presión parcial normal de 0,0037 atm, tiene un pH aproximado de 5,6.

En las tormentas con relámpagos se forma $\text{NO}(\text{g})$ mediante la reacción entre $\text{N}_2(\text{g})$ y $\text{O}_2(\text{g})$ en el aire a alta temperatura. A continuación el $\text{NO}(\text{g})$ se oxida en el aire y se forma ácido nítrico por la reacción.



Entonces, el ácido nítrico que se produce de forma natural contribuye en alguna medida a la acidez de la lluvia. Sin embargo, es más importante el $\text{HNO}_2(\text{aq})$ que se produce a partir de fuentes artificiales de $\text{NO}(\text{g})$, principalmente los procesos de combustión a alta temperatura en el aire, como ocurre en los motores de los automóviles y en las centrales térmicas. Por ejemplo, en el sur de California, donde los óxidos de nitrógeno están muy implicados en el smog fotoquímico, el HNO_2 es la contribución mayoritaria a la lluvia acida. El ácido nítrico, por término medio, es la causa de aproximadamente la cuarta parte de la acidez de la lluvia acida.

El $\text{SO}_2(\text{g})$ es un constituyente de la atmósfera, pero normalmente sólo en cantidades de trazas, que se produce fundamentalmente por descomposiciones biológicas y la actividad volcánica. Sin embargo, las fuentes artificiales de $\text{SO}_2(\text{g})$ son importantes y crean concentraciones más altas de las normales en muchas zonas. La fuente principal de SO_2 es la combustión de carbón que contiene azufre (hasta el 8% de S) en las centrales de energía eléctrica. Otra fuente es la extracción de algunos metales a partir de sus menas de sulfuro. En la atmósfera, el $\text{SO}_2(\text{g})$ puede oxidarse por varias rutas a $\text{SO}_3(\text{g})$ que es el anhídrido ácido del ácido sulfúrico. El ácido sulfúrico es la causa de más de la mitad de la acidez de la lluvia acida

Algunos efectos de la lluvia acida son claramente visibles en las zonas urbanas, en particular, en la degradación de las estatuas, monumentos y edificios hechos de arenisca,

caliza y mármol. En la India, los contaminantes ácidos del aire procedentes de las plantas industriales de los alrededores amenazan con destruir el Taj Mahal, famoso mausoleo de mármol con más de 350 años de antigüedad. Aunque los efectos ecológicos más serios son sobre las corrientes y lagos de agua dulce y sobre los bosques. Los peces y otras formas de vida acuática pueden desaparecer en los lagos ácidos. Para mantener los bosques sanos, el suelo debe proporcionar algunos nutrientes al mismo tiempo que inmoviliza otras especies como el Al^{3+} que interfiere con el ciclo nutricional de los árboles. El agua de lluvia ácida, a menudo elimina algunos nutrientes importantes de suelo y al mismo tiempo libera o moviliza especies no deseables del suelo.

Las medidas para reducir las emisiones de $\text{SO}_2(\text{g})$ y $\text{NO}(\text{g})$ incluyen la utilización de combustibles de bajo contenido en azufre, el control de las temperaturas de combustión para reducir las emisiones de $\text{NO}(\text{g})$ e impedir la emisión de gases de escape no permitidos, por diferentes medios.

3.8.1 Disoluciones reguladoras

El agua pura no tiene capacidad reguladora. Sin embargo, hay algunas disoluciones acuosas denominadas **disoluciones reguladoras** (o **disoluciones tampón**), cuyo valor de pH cambia sólo muy ligeramente con la adición de pequeñas cantidades de un ácido o una base.

Las disoluciones reguladoras necesitan dos componentes, uno que sea capaz de neutralizar ácidos, y otro capaz de neutralizar bases. Pero, por supuesto, los dos componentes no deben neutralizarse entre sí. Esto descarta las mezclas de un ácido fuerte y una base fuerte. Las disoluciones reguladoras comunes consisten en una mezcla de:

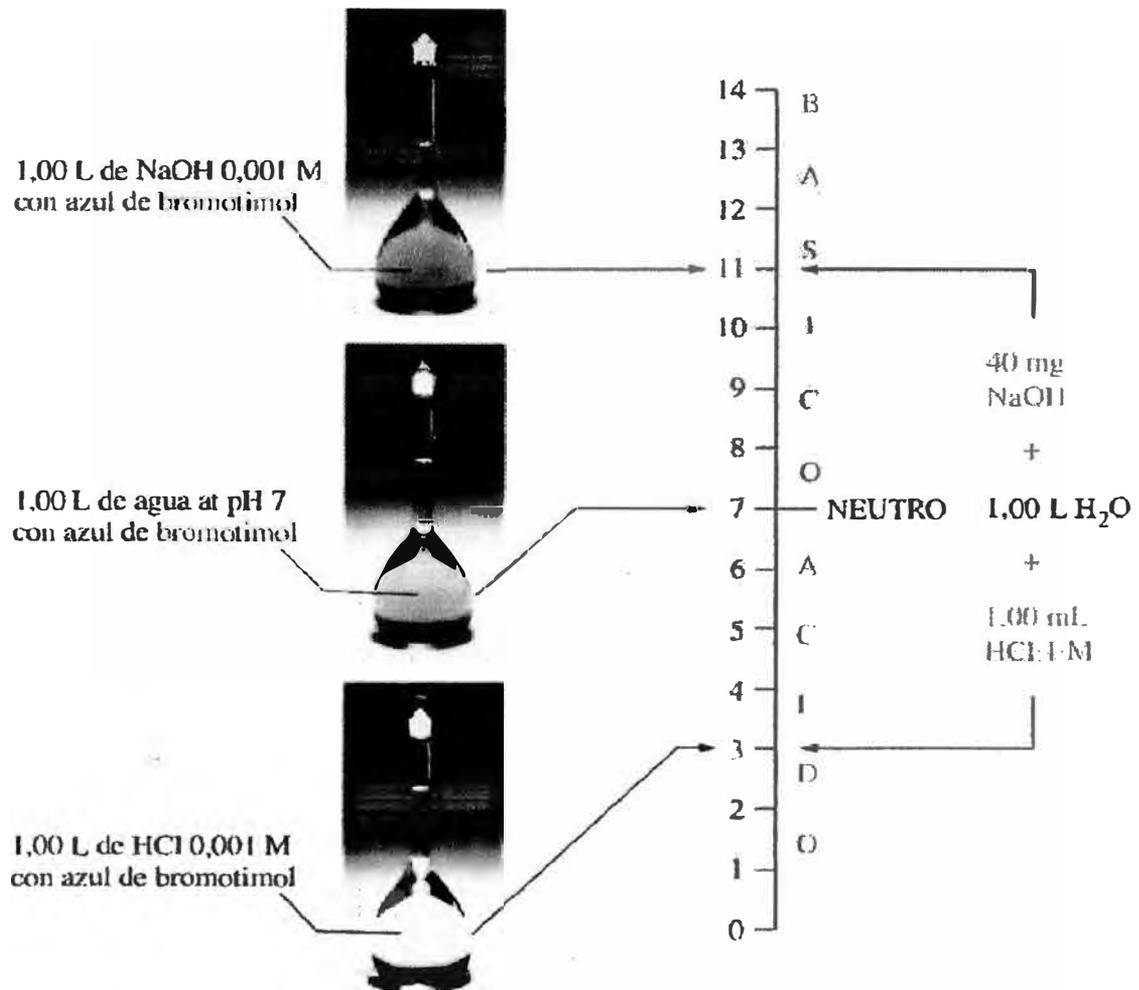
- un ácido débil y su base conjugada;
- una base débil y su ácido conjugado.

Para demostrar que estas mezclas funcionan como disoluciones reguladoras, vamos a considerar una disolución que tiene las concentraciones de equilibrio $[\text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2] = f[\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2^-]$. Como se indica en esta disolución $[\text{H}^+] = 1.8 \times 10^{-5} \text{ M}$.

$$K_a = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2^-]}{[\text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2]} = 1.8 \times 10^{-5}$$

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = K_a \times \frac{[\text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2]}{[\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2^-]} = 1.8 \times 10^{-5} \text{ M}$$

Como resultado, $\text{pH} = -\log[\text{H}_3\text{O}^+] = -\log K_a = -\log 1.8 \times 10^{-5} = 4.74$.



Ahora imagine que añadimos una *pequeña* cantidad de un ácido fuerte a esta disolución reguladora. Se produce una reacción en la que una pequeña cantidad de la base $C_2H_3O_2^-$ se convierte en su ácido conjugado $HC_2H_3O_2$.



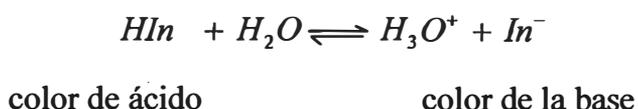
Después de neutralizarse el H_3O^+ añadido, encontramos que en la expresión $[HC_2H_3O_2]$ ha aumentado ligeramente y $[C_2H_3O_2^-]$ ha disminuido *ligeramente*. La razón $[HC_2H_3O_2]/[C_2H_3O_2^-]$ es sólo ligeramente mayor que 1, y $[H_3O^+]$ no ha cambiado prácticamente. La disolución reguladora no ha experimentado un cambio de pH después de la adición de una pequeña cantidad de ácido; el pH se mantiene próximo al valor original 4,74.

Ahora, imagine que se añade una pequeña cantidad de una base fuerte a la disolución reguladora original con $[C_2H_3O_2^-]$. Se produce una reacción en la que una *pequeña* cantidad del ácido débil $HC_2H_3O_2$ se convierte en su base conjugada $C_2H_3O_2^-$.

3.8.2 Indicadores ácido base

Un indicador ácido-base es una sustancia cuyo color depende del pH de la disolución donde se ha añadido. En este capítulo y en otros anteriores, se ha mostrado la aplicación de los indicadores ácido-base en varias fotografías. El indicador escogido depende precisamente de la acidez o basicidad de la disolución. En esta sección consideraremos cómo funciona un indicador ácido-base y cómo se selecciona un indicador adecuado para una medida de pH.

El indicador existe en dos formas: (1) un ácido débil, representada simbólicamente por HIn con un determinado color, y (2) su base conjugada, representada por In^- que tiene un color diferente. Cuando se añade una pequeña cantidad de indicador a una disolución, el indicador no afecta al pH de la disolución. Sin embargo, el equilibrio de ionización del indicador se ve afectado por la $[H_3O^+]$ de la disolución.



De acuerdo con el principio de Le Châtelier, vemos que el *aumento* de $[H_3O^+]$ en la disolución desplazad equilibrio hacia la izquierda aumentando la proporción de HIn y de ahí el color de la forma ácida. La disminución de $[H_3O^+]$ en la disolución desplaza el equilibrio hacia la derecha aumentando la proporción de In^- y de ahí el color de la forma básica. El color de la disolución depende de las proporciones relativas del ácido y la base. El pH de la disolución puede relacionarse con estas proporciones relativas y con el pK_{HIn} del indicador por medio de una ecuación similar a la ecuación.

$$pH = pK_{HIn} + \log \frac{[In^-]}{[HIn]}$$

En general, si el 90% o más de un indicador se encuentra en la forma ácida HIn , la disolución tomará el color del ácido. Si el 90 % o más se encuentra en la forma In^- , la disolución loma el color de la base (o anión). Si las concentraciones de HIn y In^- son aproximadamente iguales, el indicador se encuentra en un proceso de cambio de una forma a otra y tiene un color intermedio. El cambio completo de color se produce aproximadamente en un intervalo de 2 unidades de pH, con $pH = pK_{HIn}$ en el valor medio del intervalo.

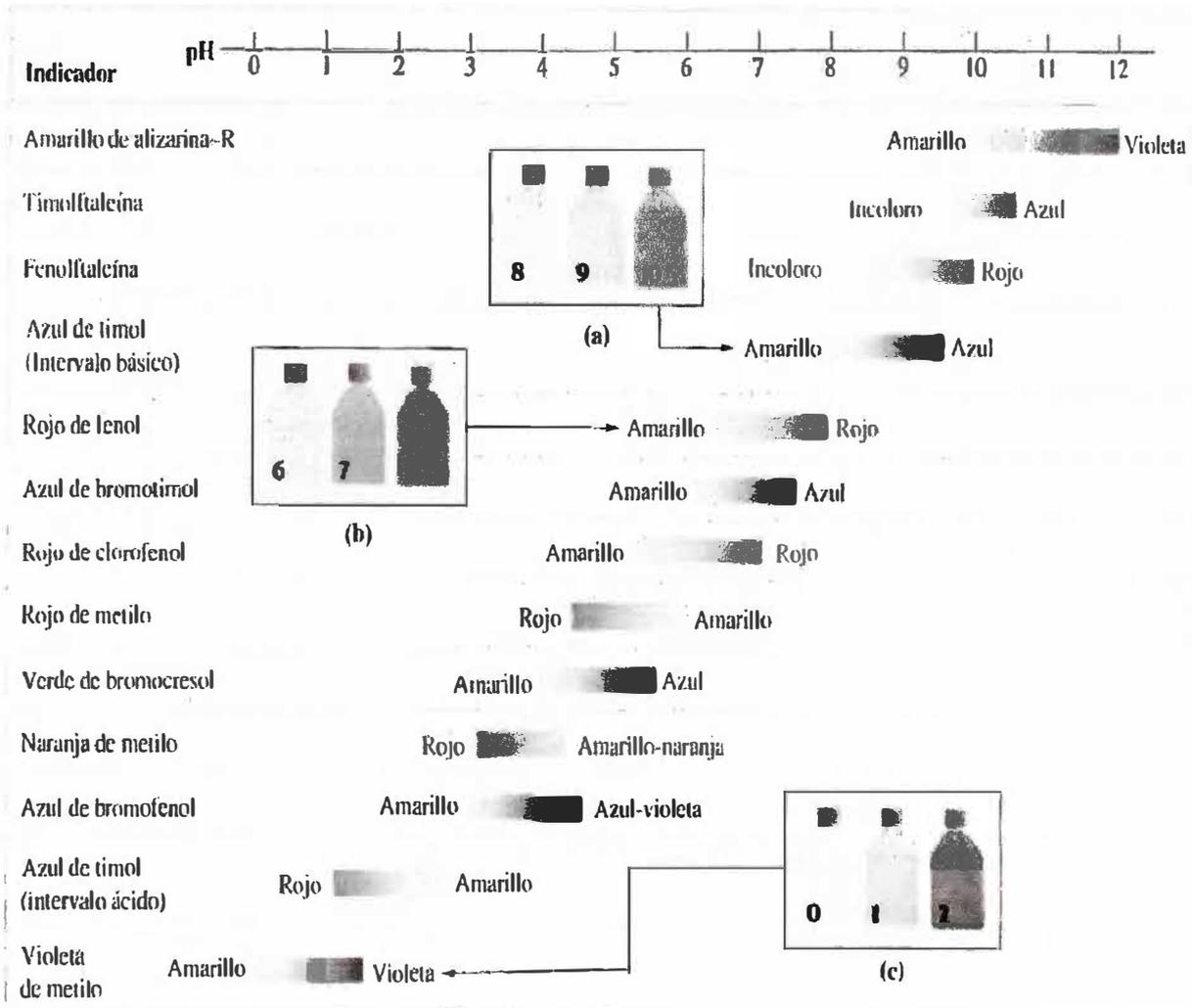


Fig. 3.7 Cambios de pH y de color de algunos indicadores ácido-base

Los indicadores descritos y los valores de pH a los que cambian el color son (a) azul de timol (pH 8-10); (b) rojo de fenol (pH 6-8); (c) violeta de metilo (pH 0-2)

Color ácido	Color intermedio	Color básico
$[In^-]/[HIn] < 0.10$	$[In^-]/[HIn] \approx 1$	$[In^-]/[HIn] > 10$
$pH < pK_{HIn} + \log 0,10$	$pH \approx pK_{HIn} + \log 1$	$pH > pK_{HIn} + \log 10$
$pH < pK_{HIn} - 1$	$pH \approx pK_{HIn}$	$pH > pK_{HIn} + 1$

Tabla 3.8. pH y colores de los indicadores ácido – base

pH < 6,1 (amarillo)

pH = 7,1 (verde)

pH > 8,1 (azul)

Un indicador ácido-base se prepara normalmente como una disolución (en agua, etanol, u otro disolvente). En las valoraciones ácido-base se añaden unas gotas de disolución de

indicador a la disolución que se va a valorar. Para otros casos, se impregna papel poroso con una disolución del indicador y se seca. Cuando se introduce este papel en la disolución que se va a valorar, adquiere un color determinado de acuerdo con el pH de la disolución. Este papel se llama normalmente papel de pH.



Comprobación del contenido de cloro
y PH en el agua de una piscina

Aplicaciones

Los indicadores ácido-base se aplican en los casos en que sólo es necesaria una determinación aproximada del pH. Por ejemplo, se utilizan en el análisis de suelos, para determinar su pH aproximado. Los terrenos normalmente son ácidos en las regiones con muchas lluvias y abundante vegetación, y alcalinos en las regiones más áridas. Sin embargo, el pH puede variar considerablemente con las condiciones locales. Si un terreno es demasiado ácido para un determinado cultivo, su pH puede aumentar añadiendo cal apagada $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$. Para disminuir el pH de un terreno, puede añadirse materia orgánica.

Para las piscinas, los agentes clorantes son más efectivos a un pH aproximado de 7,4. A este pH se evita el crecimiento de las algas y se minimiza la corrosión de las tuberías de la piscina. El rojo de fenol es el indicador que se utiliza habitualmente en el control del agua de las piscinas. Si la cloración se realiza con $\text{Cl}_2(\text{g})$, el agua de la piscina se acidifica debido a la reacción del CE con H_2O : $\text{Cl}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CT} + \text{Cl} + \text{HOCl}$. En este caso se utiliza una sustancia básica como el carbonato de sodio para aumentar el pH. Otro agente clorante muy utilizado es el hipoclorito de sodio, $\text{NaOCl}(\text{aq})$, que se obtiene mediante la reacción del $\text{Cl}_2(\text{g})$ con exceso de $\text{NaOH}(\text{aq})$: $\text{Cl}_2 + 2 \text{OH}^- \rightarrow \text{Cl}^- + \text{OCl}^- + \text{H}_2\text{O}$. El exceso de NaOH aumenta el pH del agua de la piscina. El pH se ajusta añadiendo a la piscina un ácido como el HCl o H_2SO_4 .

3.9 Reacciones de neutralización y curvas de valoración

El punto de equivalencia de una reacción de neutralización es el punto de la reacción en el que se han consumido tanto el ácido como la base, es decir en el que ninguno de los dos se encuentra en exceso.

En una valoración, la disolución que se neutraliza, por ejemplo la disolución ácida, se coloca en un matraz o vaso de precipitados junto con unas gotas de un indicador ácido-base. La otra disolución utilizada en la valoración, la base, se añade con la bureta, y se denomina valorante. El valorante se añade al ácido, primero rápidamente y luego gota a gota hasta el punto de equivalencia.

El punto de equivalencia se reconoce por el cambio de color del indicador ácido-base. El punto en el que el indicador cambia de color en una valoración se denomina punto final del indicador. El punto final debe coincidir con el punto de equivalencia de la neutralización. Es decir, si el punto final del indicador está cerca del punto de equivalencia de la neutralización, el cambio de color marcado por el punto final, indicará que se ha alcanzado el punto de equivalencia. Este ajuste se puede conseguir eligiendo un indicador cuyo cambio de color se produzca en un intervalo de pH que incluya el pH del punto de equivalencia.

Una curva de valoración es un gráfico del pH frente al volumen del valorante, la disolución de la bureta. La mayor parte de las curvas de valoración se construyen fácilmente midiendo el pH durante la valoración con un pH-metro y representando los datos en un registro gráfico. En esta sección se tratarán los cálculos necesarios para establecer el pH en los distintos puntos de una valoración. Estos cálculos servirán como revisión de algunos aspectos de los equilibrios ácido-base considerados en este capítulo y en el capítulo anterior.

El milimol

En una valoración, el volumen de disolución añadido con una bureta es menor de 50 ml (normalmente alrededor de 20-25 mL), y la molaridad de la disolución utilizada para la valoración generalmente es menor de 1 M. Normalmente la cantidad de OH (OH₃O) añadida con la bureta en una valoración es sólo de unas pocas milésimas de mol, por ejemplo, $5,00 \times 10^{-3}$ mol. En los cálculos, con frecuencia es más fácil trabajar con milimoles que con moles. El símbolo de **milimol** es **mmol**, es decir, una milésima de mol, o 10^{-3} mol.

3.9.1 Potenciales de electrodo y su medida

La Figura (3.9.1) muestra que tiene lugar una reacción redox entre Cu(s) y Ag⁺(aq), pero no entre Cu(s) y Zn²⁺(aq). Concretamente, vemos que los iones plata sobre una

superficie de cobre se reducen a átomos de plata, mientras que los iones zinc sobre una superficie de cobre no se reducen a átomos de zinc. Podemos decir que Ag^1 se reduce más fácilmente que Zn^{2+} . En esta sección introduciremos el *potencial de electrodo*, una propiedad relacionada con estas tendencias de reducción.

En el estudio de la electroquímica se denomina electrodo a una pieza de metal, M, un electrodo sumergido en una disolución que contiene iones del mismo metal, M^{n+} , se denomina *semicélula*. Entre los átomos metálicos del electrodo y los iones metálicos en disolución pueden darse dos tipos de interacciones.

1. Un ion metálico M^{n+} de la disolución puede chocar con el electrodo, tomar de él n electrones y convertirse en un átomo metálico M. El ion se reduce.
2. Un átomo metálico M de la superficie puede ceder n electrones al electrodo e incorporarse a la disolución como ion M^{n+} . El átomo metálico se oxida.

Se establece rápidamente un equilibrio entre el metal y la disolución, que podemos representar como:

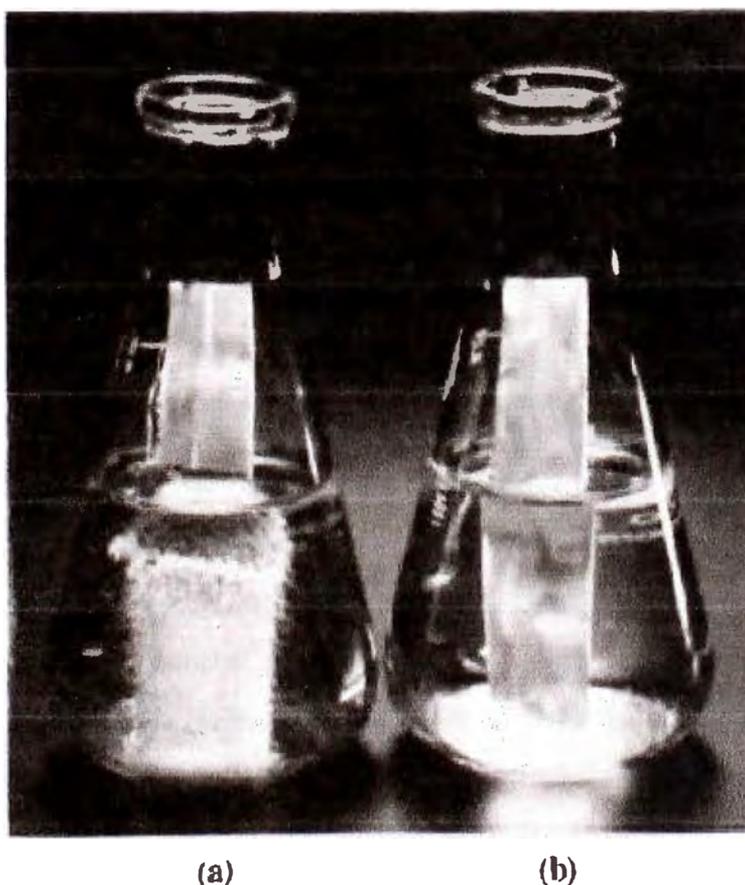
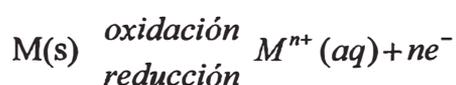


Fig. 3.9. Comportamiento de $\text{Ag}^1(\text{aq})$ y $\text{Zn}^{2+}(\text{aq})$

En presencia de cobre (a) Los iones plata son desplazados de la disolución incolora de AgNO_3 y se depositan como plata metálica. El cobre se incorpora a la disolución como el ion azul $\text{Cu}^{2+}(\text{aq})$.



(b) El $\text{Cu}(\text{s})$ *no* desplaza al ion incoloro Zn^{2+} de $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2(\text{aq})$.

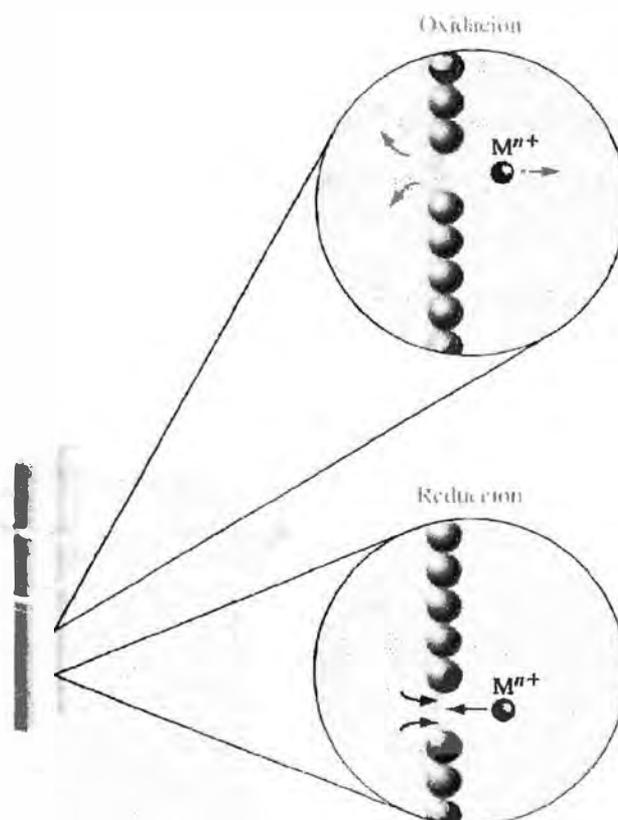


Fig. 3.9. Semicélula Electroquímica

La semicélula está formada por un electrodo metálico, M, sumergido parcialmente en una disolución acuosa de sus iones, M^{n+} . (No se muestran los aniones necesarios para mantener la neutralidad eléctrica de la disolución.) La situación ilustrada en la figura está limitada a los metales que no reaccionan con el agua.

Los cambios que se producen en el electrodo o la disolución como consecuencia de este equilibrio son demasiado pequeños para poder ser medidos. Las medidas deben basarse en una combinación de dos semicélulas distintas. Concretamente, debemos medir la tendencia de los electrones a fluir desde el electrodo de una semicélula hasta el electrodo de la otra. Los electrodos se clasifican según tenga lugar en ellos la oxidación o la reducción. Si tiene lugar la oxidación el electrodo se denomina ánodo y si tiene lugar la reducción, cátodo.

En siguiente figura muestra una combinación de dos semicélulas, una con un electrodo de Cu en contacto con $\text{Cu}^{2+}(\text{aq})$ y la otra con un electrodo de Ag y $\text{Ag}^+(\text{aq})$. Los dos electrodos están unidos por un cable metálico y un dispositivo para medir la corriente, en este caso un voltímetro. Para completar el circuito eléctrico, las dos disoluciones deben estar conectadas eléctricamente. Sin embargo, no se puede usar un cable para esta conexión porque el transporte de carga en el seno de las disoluciones se realiza por migración de iones. El contacto entre las disoluciones puede ser mediante un tabique poroso o mediante una tercera disolución, introducida generalmente en un tubo en U denominado puente salino. La combinación de las dos semicélulas conectadas de modo adecuado se denomina célula electroquímica.

Consideremos los cambios que tienen lugar en la célula electroquímica de la figura como indican las flechas, los átomos de Cu se incorporan a la disolución de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2(\text{aq})$ como iones Cu^{2+} , dejando electrones sobre el ánodo. Los electrones perdidos por los átomos de Cu pasan a través del cable y del voltímetro hacia el cátodo. Los electrones perdidos por los átomos de Cu pasan a través del cable y del voltímetro hacia el cátodo.

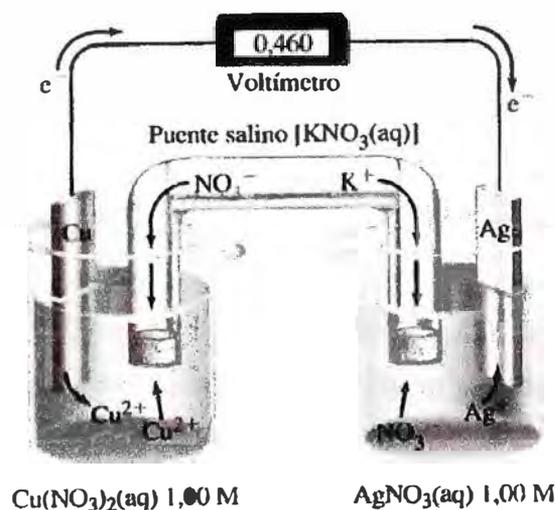
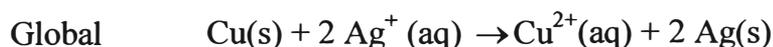
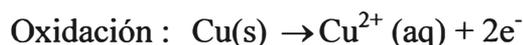


Fig. 3.10 Medida de la fuerza electromotriz de una célula electroquímica

Una célula electroquímica está formada por dos semicélulas cuyos electrodos se unen mediante un cable y cuyas disoluciones están en contacto mediante un puente salino. (Los extremos del puente salino están cerrados con un material poroso que permite que emigren los iones sin que fluya el líquido.) Los electrones fluyen del electrodo de Cu, donde tiene lugar la oxidación (ánodo), al electrodo de Ag, donde se produce la reducción (cátodo).

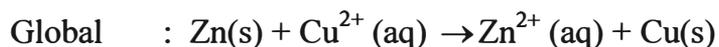
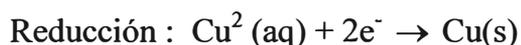
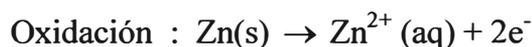
Para medidas precisas debe extraerse de la célula una cantidad muy pequeña de corriente, ya sea utilizando un voltímetro especialmente diseñado o un dispositivo denominado potenciómetro.

En este electrodo los iones Ag^+ de $\text{AgNO}_3(\text{aq})$ adquieren electrones y se depositan como plata metálica. Simultáneamente, los aniones (NO_3^-) del puente salino se mueven hacia la semicélula del cobre y neutralizan la carga positiva debida al exceso de iones Cu^{2+} . Los cationes (K^+) se mueven hacia la semicélula de la plata y neutralizan la carga negativa debida al exceso de iones NO_3^- . La reacción neta que tiene lugar cuando la célula electroquímica produce espontáneamente corriente eléctrica es



La lectura del voltímetro (0,460 V) tiene un significado. Es el voltaje de la célula o diferencia de potencial entre las dos semicélulas. La unidad del voltaje de la célula, el voltio (V), es la energía por carga unidad. Es decir, una diferencia de potencial de un voltio indica una energía de un julio por cada culombio de carga que pasa por el circuito eléctrico: $1\text{V} = 1 \text{ J/C}$. Se puede considerar que el voltaje o diferencia de potencial es lo que hace moverse los electrones, a mayor voltaje, mayor fuerza impulsora. El voltaje de una célula también se denomina fuerza electromotriz (fem) o potencial de célula y se representa como E_{cel} .

Si construimos una célula electroquímica consistente en una semicélula $\text{Zn}(\text{s})/\text{Zn}^{2+}(\text{aq})$ y una semicélula $\text{Cu}^{2+}(\text{aq})/\text{Cu}(\text{s})$, resulta que los electrones van desde el Zn hacia el Cu. La reacción espontánea.



No es difícil establecer una relación entre el potencial de la célula, y las concentraciones de reactivos y productos. Podemos tomar la ecuación.

ΔG y ΔG° pueden sustituirse por $-nFE_{\text{cel}}$ and $-nFE_{\text{cel}}^\circ$, respectivamente.

$$-nFE_{\text{cel}} = -nFE_{\text{cel}}^\circ + RT \ln Q$$

Ahora, dividiendo por $-nF$ se obtiene

$$E_{\text{cel}} = E_{\text{cel}}^\circ - \frac{RT}{nF} \ln Q$$

Esta ecuación fue propuesta por primera vez por Walther Nernst en 1889 y suele ser utilizada por los químicos analíticos en la forma en que Nernst la formuló. Se puede obtener la ecuación de Nernst pasando de logaritmos neperianos a decimales ($\ln Q = 2,3026 \log Q$).

$$E_{\text{cel}} = E_{\text{cel}}^\circ - \frac{2,3026 RT}{nF} \log Q$$

Si se toma una temperatura de 298,15 K y se sustituye el término RT/F por 0,025693 V, como se hizo al obtener la Ecuación (21.17) se encuentra que $2,3026 RT/F = 23026 \times 0,025693 \text{ V} = 0,059161 \text{ V}$, generalmente redondeado a 0,0592 V. La forma final de la ecuación de Nernst es:

$$E_{\text{cel}} = E_{\text{cel}}^\circ - \frac{0,0592V}{n} \log Q$$

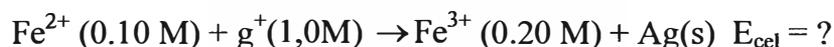
En la ecuación de Nernst se hacen las siguientes sustituciones habituales en Q : $a = 1$ para las actividades de sólidos y líquidos puros, presiones parciales (atm) para las actividades de los gases y molaridades para las actividades de los componentes de la disolución.

Solución

Cuando se utiliza la ecuación de Nernst son necesarias dos etapas. Primero se determina E_{cel}° .

$$\begin{aligned} E_{\text{cel}}^\circ &= E^\circ (\text{cátodo}) - E^\circ (\text{ánodo}) \\ &= E_{\text{Ag}^+ / \text{Ag}}^\circ - E_{\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+}}^\circ \\ &= 0,800 \text{ V} - 0,771 \text{ V} = 0,029 \text{ V} \end{aligned}$$

Ahora para determinar E_{cd} para la reacción



se sustituyen en la ecuación de Nernst (21.18) los valores adecuados, comenzando con $E_{\text{cel}}^\circ = 0,029 \text{ V}$ y $a = 1$,

$$E_{\text{cel}} = 0,029 \text{ V} - \frac{0,0592 \text{ V}}{1} \log \frac{[\text{Fe}^{3+}]}{[\text{Fe}^{2+}][\text{Ag}^+]}$$

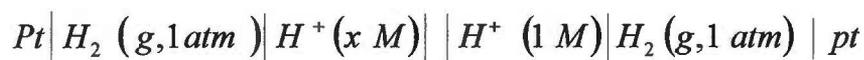


Electrodo de vidrio y pH-metro

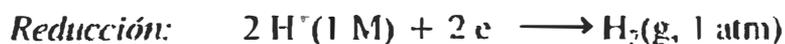
El potencial de un electrodo de vidrio depende de la concentración de iones hidrógeno de la disolución problema. El pH-metro transforma la diferencia de potencial entre el electrodo de vidrio y un electrodo de referencia en una lectura de pH.

Célula de concentración

Está formada por dos electrodos de hidrógeno. Uno es el electrodo estándar de hidrógeno (EEHH) y el otro es un electrodo inmerso en una disolución de valor de $[H^+]$ desconocido, menor de 1 M. El esquema de célula es:



La reacción que tiene lugar en esta célula es:



$$E_{\text{cel}}^{\circ} = E_{H^+/H_2}^{\circ} - E_{H^+/H_2}^{\circ} = 0V$$

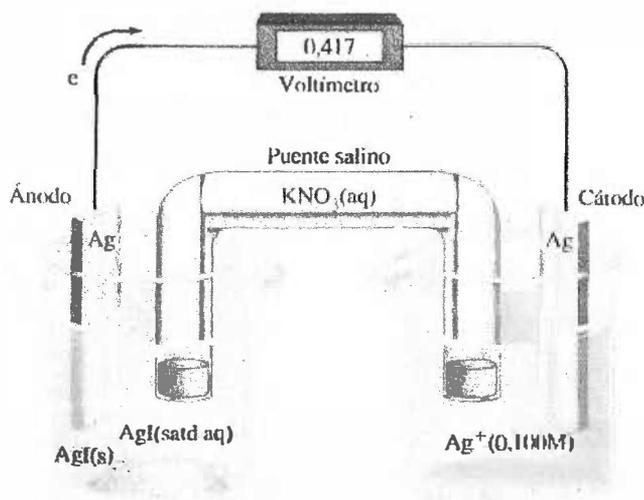


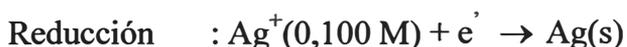
Fig. 3.11 Célula de concentración para determinar K_{sp} del AgI

El electrodo de plata en el compartimiento anódico está en contacto con una disolución saturada de AgI. En el compartimiento catódico $[Ag^+] = 0,100 \text{ M}$.

Medida de K_{sp}

En una célula de concentración el valor de E_{cel} depende de la diferencia en las concentraciones de los iones en las dos semicélulas. Esta relación también proporciona un método de determinación de valores de K_{sp} para compuestos iónicos poco solubles. Considere la siguiente célula de concentración $Ag(s)|Ag^+(satd AgI)||Ag^+(0,100M)|Ag$ $E_{cel} = 0.417 \text{ V}$

En el ánodo hay un electrodo de plata inmerso en una disolución acuosa saturada de yoduro de plata. En el cátodo hay otro electrodo de plata inmerso en una disolución con $[Ag^+] = 0,100 \text{ M}$. Las dos semicélulas se conectan mediante un puente salino y la medida del voltaje de la célula es $0,417 \text{ V}$ (Figura 3.9.4). La reacción que tiene lugar en esta célula de concentración es



Solución

Representemos por x el valor de $[Ag^+]$ en una disolución saturada de yoduro de plata. A continuación se puede aplicar la ecuación de Nernst a la reacción.

(Por simplicidad se ha omitido en las ecuaciones la unidad V que debería aparecer en varios sitios.)

$$\begin{aligned}
 E_{cel} &= E_{cel}^o - \frac{0,0592}{n} \log \frac{[Ag^+]_{satd AgI}}{[Ag^+]_{0,100M disol}} \\
 &= E_{cel}^o - \frac{0,00592}{1} \log \frac{x}{0,100} \\
 0,417 &= 0 - 0,0592 (\log x - \log 0,100)
 \end{aligned}$$

Dividiendo ambos miembros de la ecuación por 0,0592,

$$\begin{aligned}
 \frac{0,417}{0,0592} &= -\log x + \log 0,100 \\
 \log x - \log 0,100 &= \frac{0,417}{0,0592} - 1,00 \quad 7,04 - 8,04 \\
 [Ag^+] &= 10^{-8,04} = 9,1 \times 10^{-9} M
 \end{aligned}$$

Como en una disolución saturada de AgI las concentraciones de Ag^+ e I son iguales.

$$K_{sp} = [Ag^+][I^-] = (9,1 \times 10^{-9})(9,1 \times 10^{-9}) = 8,3 \times 10^{-17}$$

La célula de mercurio en el proceso cloro-sosa

El cátodo es una capa de Hg(l) que fluye sobre la base del recipiente. Los ánodos, en los que se forma $Cl_2(g)$, están sumergidos en el $NaCl(aq)$ justo por encima del Hg(l). El sodio formado en el cátodo se disuelve en el Hg(l). Esta amalgama de sodio se descompone con agua para producir $NaOH(aq)$ y $H_2(g)$. El Hg(l) regenerado se recicla.

parado con 2500 para la célula con diafragma. Otro grave inconveniente es la necesidad de controlar los escapes de mercurio. Las pérdidas de mercurio, que llegaron en algún; época a alcanzar 200 g Hg por tonelada de Cl_2 , han sido reducidas hasta aproximadamente 0,25 g Hg por tonelada de Cl_2 en las plantas ya existentes y hasta la mitad de esta cantidad en las plantas de nueva construcción.

El proceso cloro-sosa ideal debería tener un bajo consumo de energía y evitar utiliza mercurio. Un tipo de célula que cumple estos requisitos es la célula de membrana. En el se sustituye el diafragma penoso de la figura (3.9.4.1) por una membrana intercambiaron de cationes, generalmente hecha con un polímero fluorocarbonado. La membrana permite el paso entre los compartimentos anódico y catódico de los cationes hidratados (Na^+ j H_3O^+) pero restringe en gran medida el flujo de los iones Cl^- y OH^- . Se conectan como sigue dos células electroquímicas:

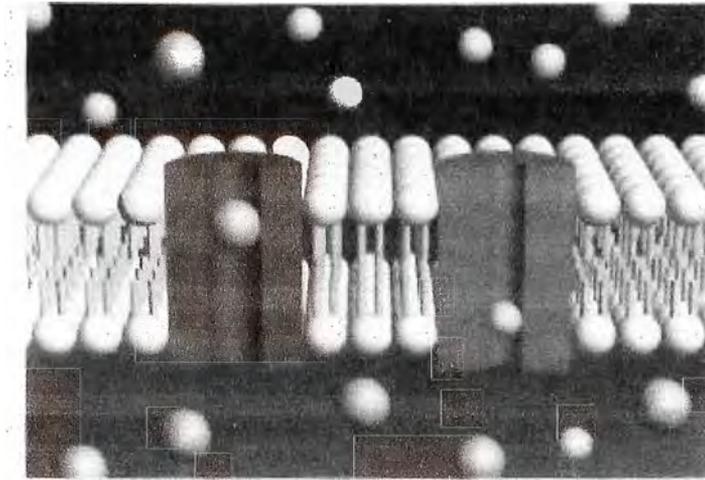


Fig. 3.12 Membrana Celular

Modelo de parte de una membrana celular generado por ordenador. Los iones Na^+ y K^+ atraviesan la membrana a través de canales. El canal del K^+ es azul y el del Na^+ es rojo. Figura (3.12) al más diluido. Como resultado, el lado izquierdo tiene un potencial negativo (exceso de aniones) con respecto al lado derecho. Esta diferencia de potencial hace que no puedan cruzar la membrana más iones K^+ . El equilibrio se alcanza cuando se compensan exactamente la diferencia de potencial eléctrico y la tendencia de las concentraciones a igualarse. Esta diferencia de potencial se denomina Potencial de Nernst $\Delta\phi$.

Las células electroquímicas ordinarias están formadas por conductores metálicos inmersos en disoluciones de electrolitos. En los seres vivos no hay conductores metálicos. ¿Cuál es entonces el origen de las corrientes eléctricas biológicas como las generadas al contraerse los músculos o en la actividad de las neuronas? La respuesta es los potenciales de membrana.

Cuando se separan por medio de una membrana dos disoluciones de electrolitos con distinta concentración, suele aparecer una diferencia de potencial a través de la membrana, aunque hay varias situaciones posibles. Puede que la membrana no sea permeable ni a los iones ni al disolvente. En este caso, si se inserta un electrodo a cada lado de la membrana y se unen las disoluciones por un puente salino se crea una simple célula de concentración. El potencial de célula vendrá dado por la ecuación de Nernst.

La Figura 3.12 muestra disoluciones de KCl separadas por una membrana. Si la membrana es permeable a los iones K^+ y Cl^- , con el tiempo se igualan las concentraciones y desaparece la diferencia de potencial (Figura 3.12a). Sin embargo, si la membrana no es permeable al disolvente* y sólo es permeable a los iones potasio, hay un flujo neto de iones

K^+ que cruzan la membrana desde el lado más concentrado (lado izquierdo de la membrana en la figura (3.12b))

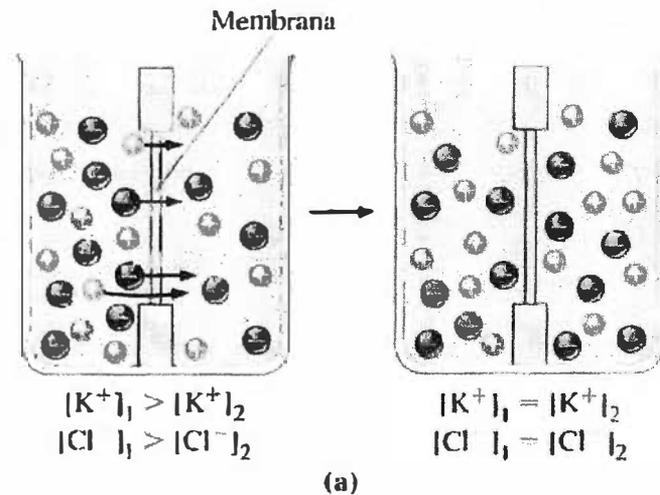


Fig. 3.12a Generación del potencial de membrana

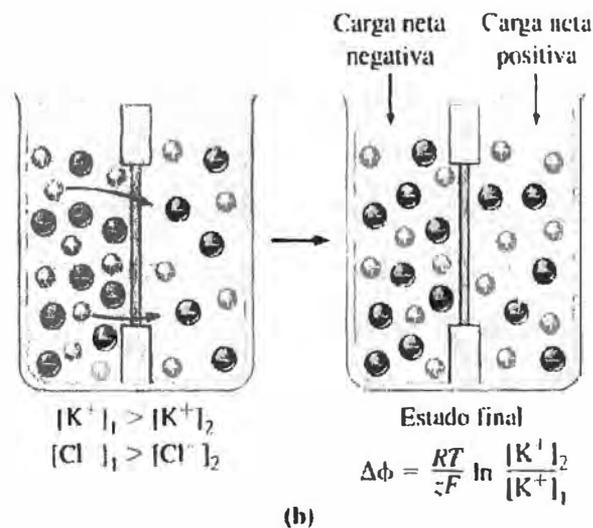


Fig. 3.12b Generación del potencial de membrana

La diferencia de energía Gibbs ΔG_e debida a la diferencia de potencial $\Delta\phi$ viene dada por $\Delta G_e = zF\Delta\phi$

donde z es la carga de los iones permeables ($z = 1$ para el K^+) y F es la constante de Faraday. En la Figura 3.9.4.2b, el potencial es más alto en el lado derecho porque en ese lado hay más iones K^+ que en el izquierdo. Por lo que respecta a los iones K^+ del lado derecho, $\Delta C_e > 0$. Además, hay una diferencia de energía Gibbs adicional debida a la diferente concentración de los dos compartimentos.

$$\Delta G_e = RT \ln \frac{[K^+]_1}{[K^+]_2}$$

En el equilibrio el valor de ΔG a través de la membrana es nulo. Por tanto,

$$\Delta G = \Delta G_e + \Delta G_c = zF\Delta\Phi + RT \ln \frac{[K^+]_1}{[K^+]_2} = 0$$

y el potencial de Nernst viene dado por

$$\Delta\Phi = \frac{RT}{zF} \ln \frac{[K^+]_2}{[K^+]_1}$$

Las células musculares de los mamíferos permitan libremente los iones K^+ pero son mucho menos permeables a los iones Na^+ y Cl^- . Las concentraciones de los iones K^+ suelen ser $[K^+] = 155 \text{ mM}$ dentro de las células y $4,00 \text{ mM}$ fuera de ellas. El potencial de Nernst a 310 K (37°C) es

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= \frac{8,3145 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1} \times 310 \text{ K}}{96\,500 \text{ C mol}^{-1}} \ln \frac{4}{155} \\ &= -0,0977 \text{ V} = -97,7 \text{ mV} \end{aligned}$$

En los organismos multicelulares, los contenidos de una célula se separan de los de las demás por una membrana semipermeable. El potencial es negativo dentro de la célula y positivo fuera. Las medidas de estos potenciales dan valores próximos a -85 mV porque hay una cierta difusión de los iones Na^+ y Cl^- y además hay un mecanismo de bombeo biológico que no permite que la diferencia de potencial exceda mucho de un cierto valor. La diferencia de potencial que se mide es la existente entre el interior y el exterior de la célula y se denomina potencial de membrana.

Las medidas del potencial de membrana de varias células oscilan entre -30 y -100 mV , siendo más bajo el potencial en el interior que en el exterior. El valor de una célula nerviosa (calamar) inactiva (en reposo) es -70 mV , Las células nerviosas son permeables a los tres iones, K^+ , Na^+ y Cl^-

Para el potencial de reposo de -70 mV , el ion Cl^- está casi en equilibrio, pero no lo están los iones K^+ y Na^+ . Las concentraciones del estado estacionario observadas para K^+ y Na^+ se mantienen por los activos procesos de transporte de la célula que utiliza parte de su energía metabólica para bombear continuamente el Na^+ hacia fuera de la célula y el K^+ hacia dentro. Las células mantienen al K^+ y Na^+ en un estado de no equilibrio. En el equilibrio no sucede nada.

Durante los impulsos nerviosos, la actividad proteínica en la membrana hace que el Na^+ entre en la célula y el K^+ la abandone, produciéndose un cambio del potencial de membrana hacia el valor + 60 mV. Se dice que la célula se ha despolarizado. Después de alcanzar este máximo de 60 mV, la célula vuelve a su potencial de descanso bombeando los iones Na^+ hacia fuera y los iones K^+ hacia dentro. Los mecanismos por los que las células cambian la permeabilidad a los iones son un área actual de investigación.

CAPITULO IV

IMPLEMENTACIÓN DE LA MEDIDA AUTOMATIZADA DEL Ph

4. Descripción y características de la implementación de la automatización.

Ambos métodos descritos líneas arriba, no garantizan los valores obtenidos no son fidedignos o representativos de los valores que maneja el proceso, solo son referenciales; la medición con dichos métodos no es continua, es solo del tipo muestreo y por lo tanto no siempre guarda relación con el resto de la producción que en todo momento puede tener variaciones en el tiempo, asimismo se debe anotar que el intervalo que toma la realización de una medición es en promedio de 20 a 30 minutos, lapso en el que puede haber cambiado dicho parámetro.

En un principio las mediciones del PH se han realizado usando el papel de tornasol, la medición es manual y según la coloración del papel.

En la actualidad se plantea como solución la automatización de las mediciones del PH, estas se realizan de manera instantánea y de manera continua (medición en línea), en el mismo punto de operación con las condiciones inherentes del proceso.

Esta medición se realizan con equipos modernos que permiten automatizar el proceso de a medición y la compensación, obteniéndose un producto final, de alta calidad, con optimización de recursos y con el PH deseado

En este capítulo detallaremos la implementación de la automatización en la medición del PH. [2], [3] y [4]

4.1. Automatismo

Conjunto de dispositivos eléctricos, electrónicos, neumáticos, etc., capaz de controlar en forma automática, el funcionamiento de una máquina o proceso.

4.2. Necesidades de un Automatismo

Realizar operaciones que son imposibles manualmente tales como:

- Velocidad en la reacción del sistema
- Alcanzar mejor precisión
- Resolver sistemas complejos.

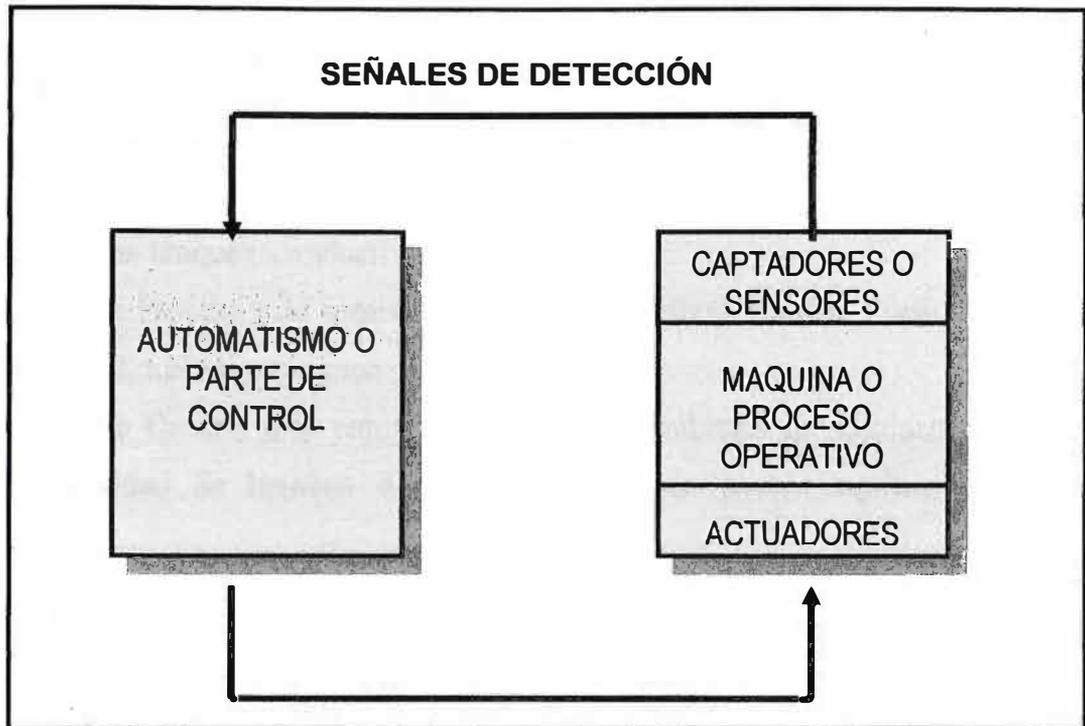


Fig. 4.1 Lógica de Automatización de Proceso

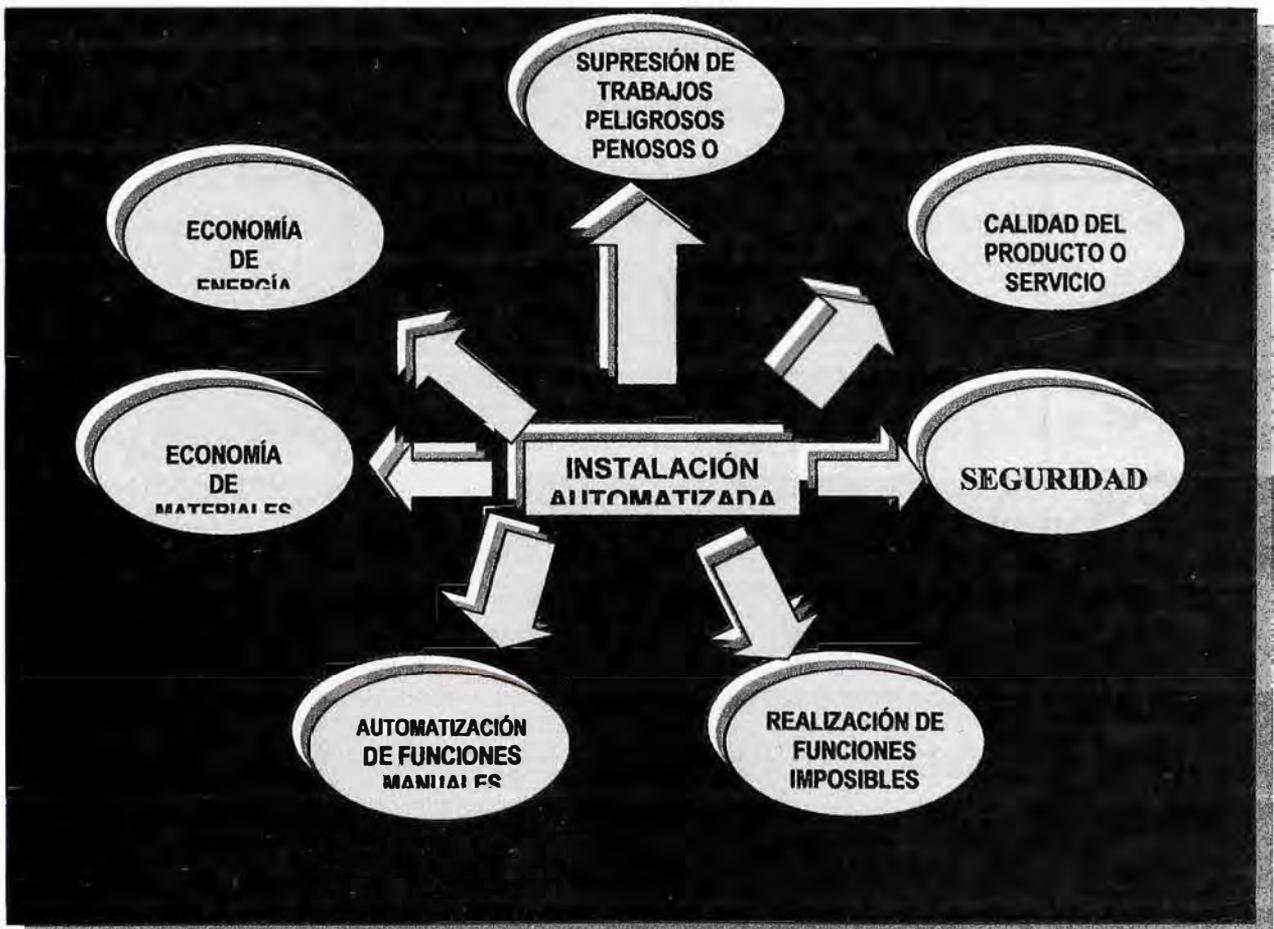


Fig. 4.2 Instalación automatizada

4.3. Lazos de Control

- En general se utilizarán formas de control convencional de tipo Proporcional Integral Derivativo o Proporcional Integral para el control de variables.
- Ejemplos: Lazo de Control de PH en proceso azúcar de dosificado de aditivos, de nivel de líquidos en tanques, conductividad etc.
- Variables de Proceso más comunes: Temperatura, Nivel, Caudal, Presión, Densidad, PH, conductividad, turbidez, oxígeno disuelto, etc.
- Variables de Control más comunes: Posición en válvulas de suministro de vapor, agua fría, velocidad de bombas o ventiladores (deben poseer equipos para variar velocidad), etc.

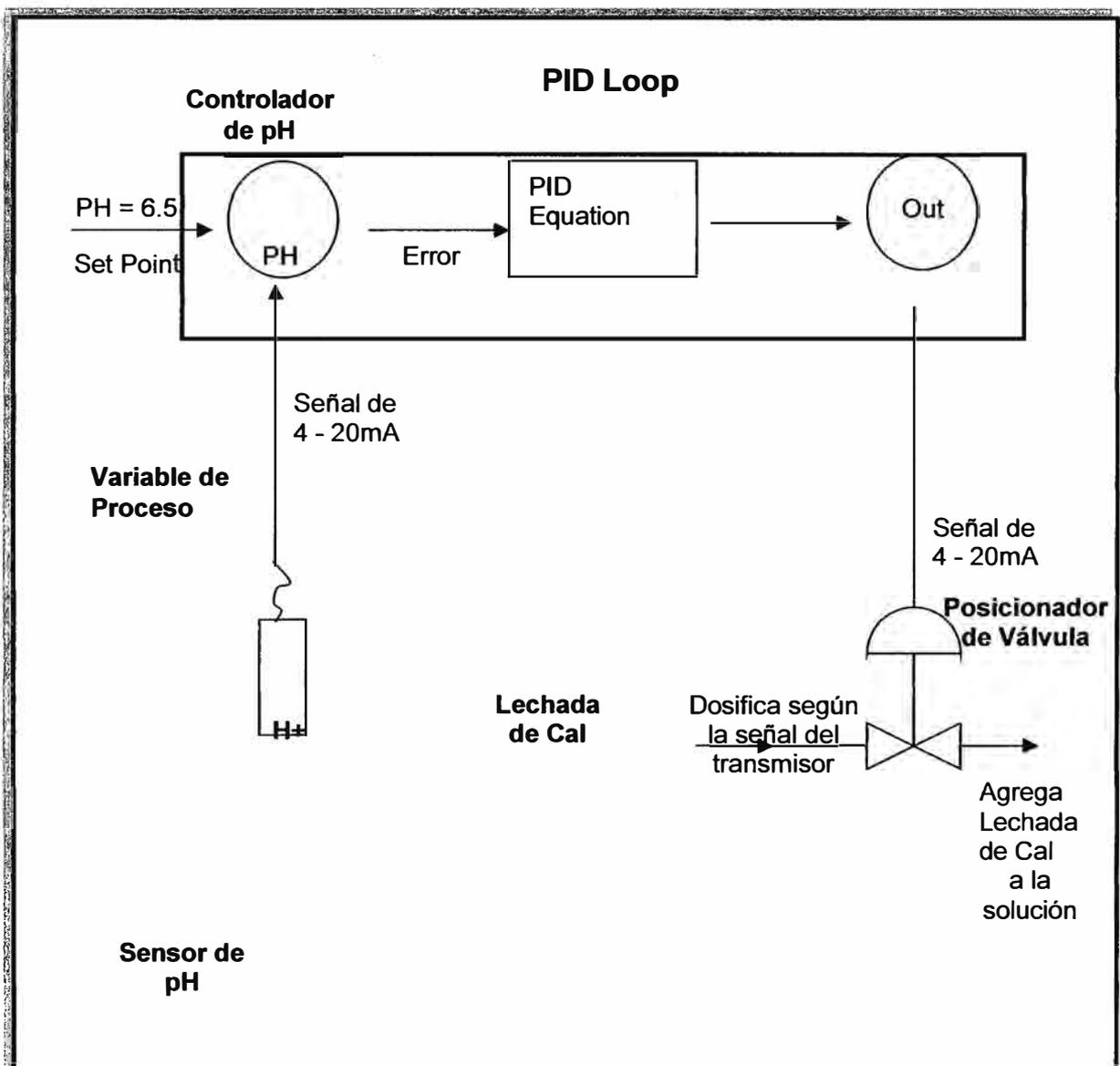


Fig. 4.3 Lazo de control

Pautas Generales para Automatizar Procesos

Lazos de Control

- En los casos más sencillos el valor de consigna o setpoint es suministrado por el operador vía alguna interfaz maquina – humano.
- En otros casos la variable de control de un lazo podría ser la consigna de otro lazo. Esto se suele llamar lazos en cascada.

En general los controladores automáticos de proceso poseen un conjunto de instrucciones que incluyen una instrucción llamada “PID” que contiene la ecuación con sus parámetros a sintonizar y variables correspondientes. Inclusive hay tecnologías que permiten mediante algunas condiciones, la auto sintonización de dichos lazos. [8]

4.4 Controladores Programables

Definimos controladores programables como equipos industriales que tienen la capacidad de procesar programas que se sirven de datos de planta que llegan mediante señales eléctricas (sensores, transmisores, estados en general, etc) y dan mando sobre equipos (válvulas, motores, etc) respetando dicho programa. Estos controladores disponen de un set point donde se ingresa el valor de pH a controlar. [3]

4.5. SENSOR DE pH

El sensor de pH es el dispositivo que se encarga de la medición de la concentración de iones hidrógeno.

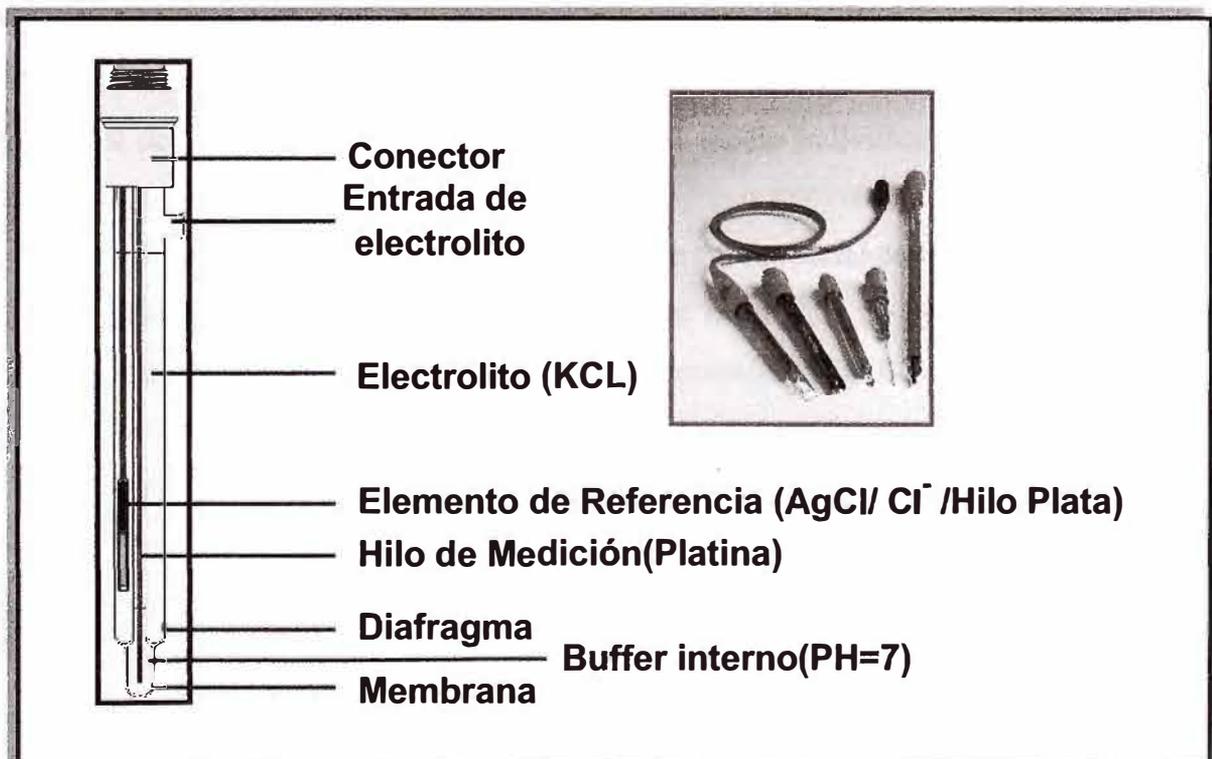


Fig. 4.4 Estructura del Sensor del pH [1]

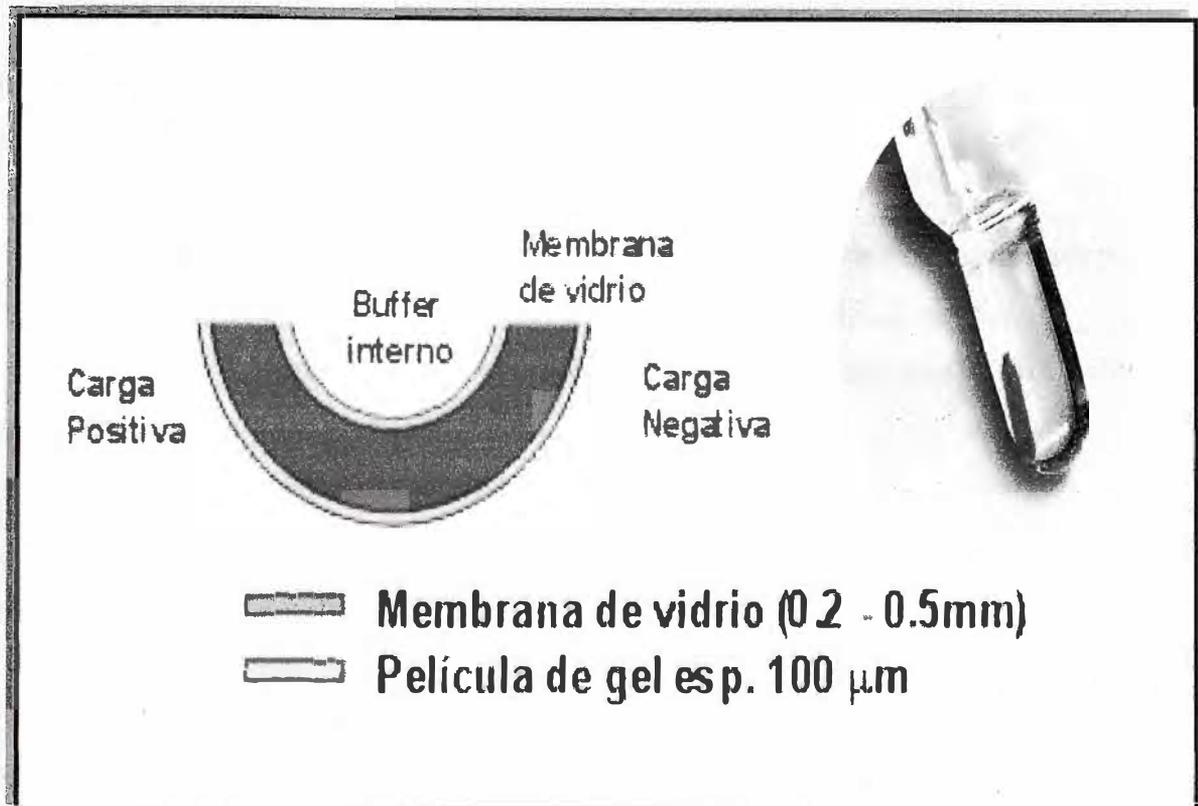


Fig. 4.5. Membrana de Medición

- Un buffer interno que genere un punto cero constante.
- Membrana con una alta selectividad al H^+
- Buenas propiedades mecánicas [1]

Electrodo Industrial (Proceso)

- Vidrios resistentes a alta temperatura

El potencial del electrodo de medición no puede ser medio individualmente. Es necesario un electrodo de referencia.

El potencial de éste electrodo debe ser independiente del potencial de la muestra

4.6. Implementación de la Automatización en la Medición de pH

En la implementación de la automatización en la medición del pH en línea en el proceso, se necesita lo siguiente:

1. 01 medidor de pH, con salida de corriente de 4-20 mA el medidor contiene un transductor que convierte la señal de pH (mV) en niveles de corriente de 4-20 mA que luego serán enviados a un controlador, la señal en mV la envía el sensor de pH.
2. 01 controlador, que reciba la señal de 4-20 mA y tenga señal de salida de 4-20 mA.

El controlador se encarga de gobernar el control del pH al valor seteado, para lograr su objetivo envía una señal de corriente de 4-20 mA al posicionador de válvula

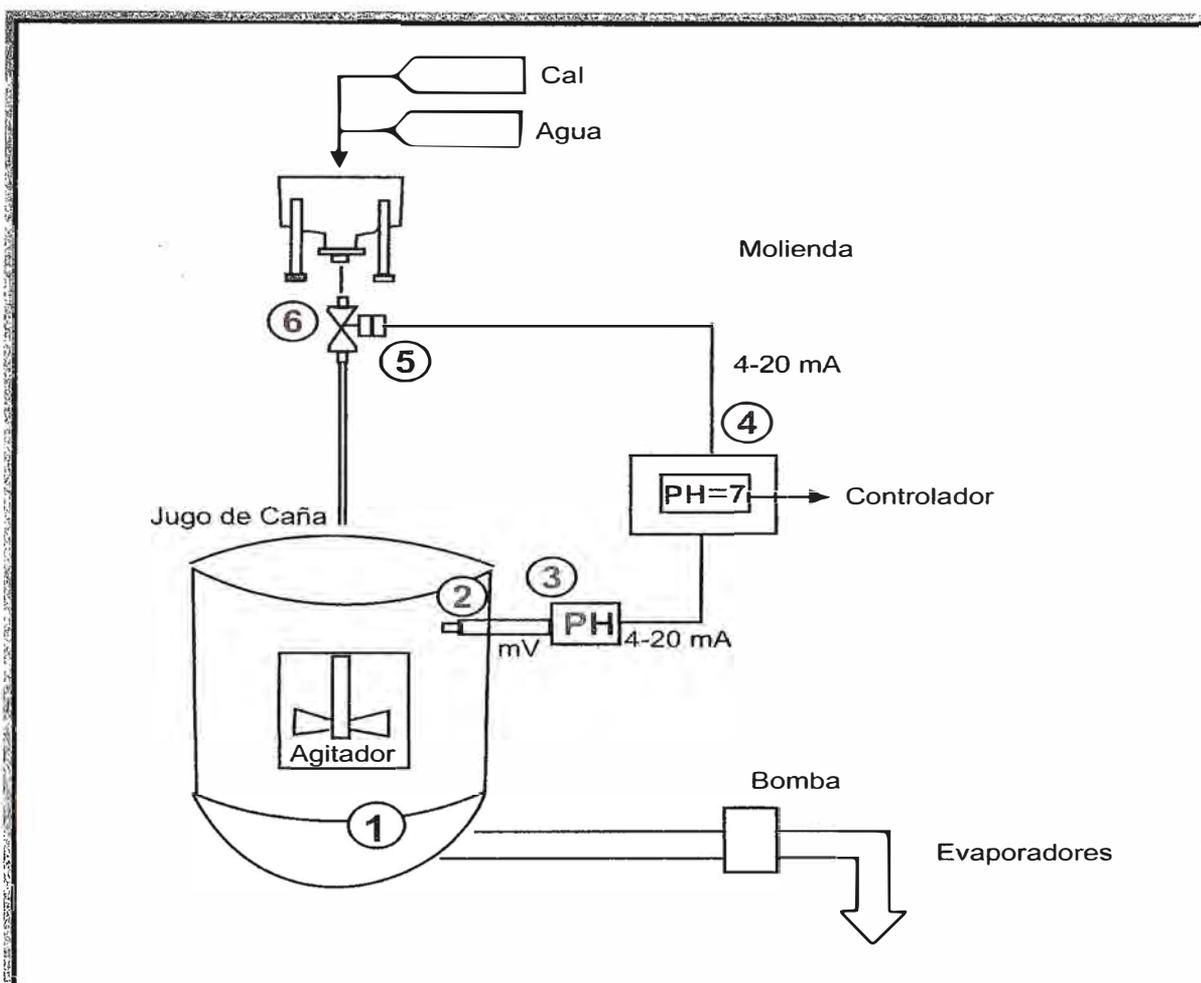
3. 01 Válvula dosificadora

Permite el ingreso de la solución compensadora, es controlado por el posicionador de válvula.

4. 01 Posicionador de válvula

Recibe la señal del controlador permitiendo la apertura ó cierre de la válvula esta permite el ingreso o el rechazo de la solución compensadora, para el equilibrio del pH.

5. 01 Sensor de pH, sensa la acidez de la solución y envía la señal en mV (mili voltios) al controlador. [1] y [8]



- | | |
|----------------------------|----------------------------|
| 1. Tanque de Jugo Encalado | 4. Controlador |
| 2. Sensor de pH | 5. Posicionador de Válvula |
| 3. Transmisor de pH | 6. Válvula |

Fig. 4.6 Esquema de proceso de la Automatización del pH

CAPITULO V ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se comparará las mediciones de Laboratorio con las mediciones en línea usando los equipos modernos que permiten automatizar el proceso.

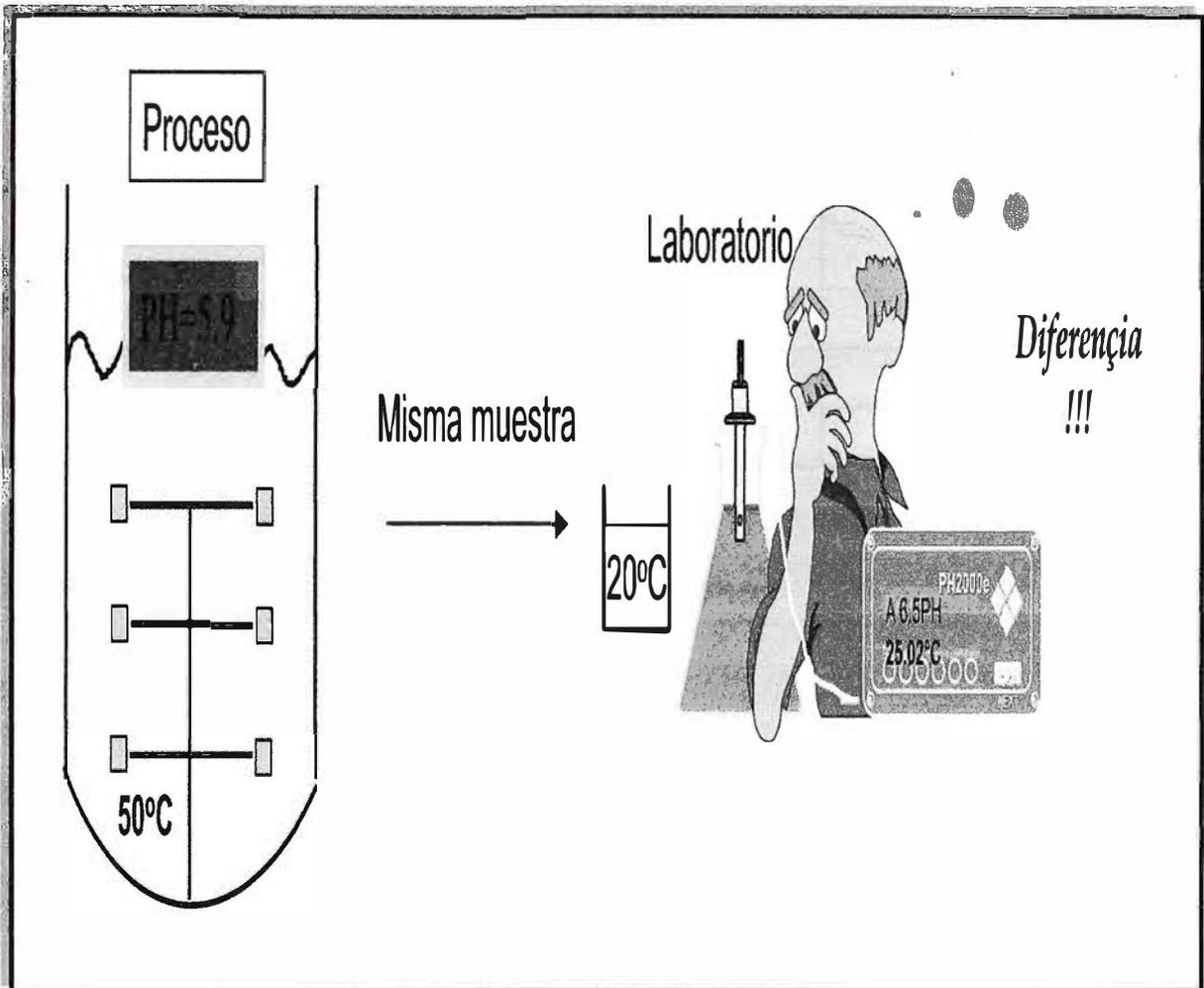


Fig. 5.1 Comparación en la medición del pH (Laboratorio – Proceso)

PH en el Reactor \neq PH en el Vaso

5.1 Comparación de la medición en laboratorio y medición en el proceso.
(set point = ph = 3.55).

Tabla 5.1. PH VS Tiempo

Tiempo	Medición del PH en Laboratorio	Medición del PH (tanque en proceso)
8	3.5	3.5
20	3.5	3.9
30	3.5	4.1
45	3.5	4.5
60	3.5	4.9
75	3.9	3.9
90	3.7	3.6
105	3.7	3.3
120	3.7	3.0
128	3.7	3.3
35	3.5	3.5
165	3.5	3.6

Laboratorio x Proceso

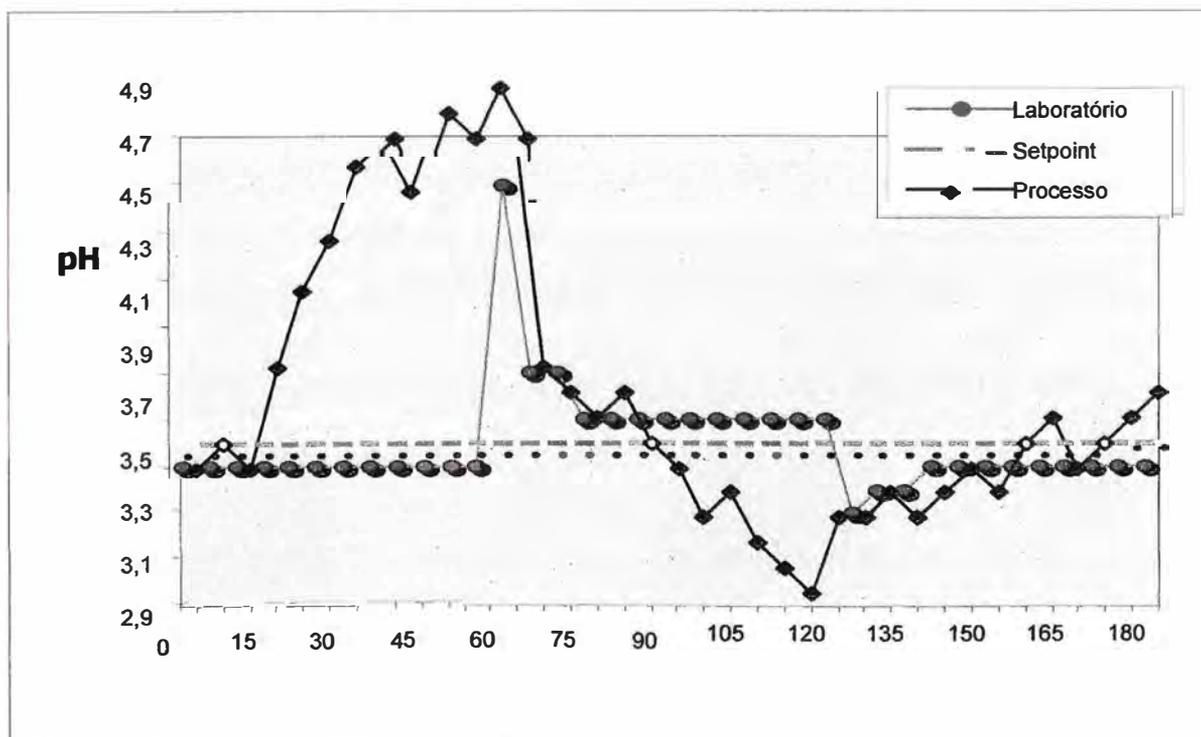


Fig. 5.1. Gráfica de medición de pH (Laboratorio – proceso)

5.2. Causas de las diferencias

- La Muestra no tiene las mismas condiciones (Presión) del proceso.
- La Muestra del pH es inestable (Características de solución), por ser heterogéneos.
- La Muestra reacciona con CO₂, O₂ u otro gas atmosférico.
- La Temperatura de la muestra es diferente de proceso, electrodo Portátil Frío.
- La comparación por muestreo es puntual y no continuo.
- La medición es en línea y no indirecta como los otros métodos.

CAPITULO VI

APLICACIÓN

6.1. CALEACIÓN

Es el proceso de añadir la leche de cal al jugo neutralizando su pH.

La caleación es realizada en tanques o en línea (proceso continuo) para obtener el control del pH final.

Esta neutralización busca la eliminación de colorantes del jugo.

Rango de medición: 6.8 a 7.2 pH, [1]

6.2. CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE MEDICIÓN

Rango de pH: 6.8 a 7.2 pH

Temperatura: 80 enfriamiento a 40°C

Instalación: Tubería

Dificultades de medición

Sólidos suspendidos

Tapadura del diafragma por cal

Incrustación de la membrana

Solución Implementada

Limpieza automática (HN03 5%) a cada 3 horas por 60 segundos

Durabilidad : (Con In Trac) 1 Año

Sistema : pH 2100 In Trac 777 / Easy Clean / In Pro 4250 (Xeroly® Plus)

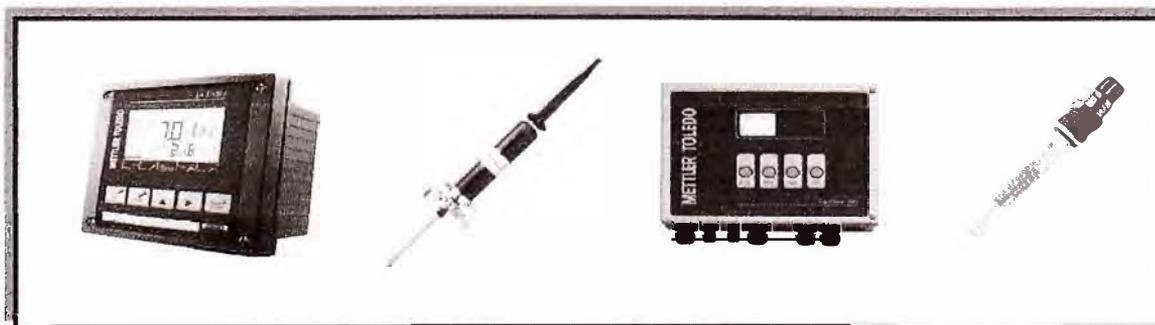


Fig. 5.1 Equipos para la automatización del pH

VENTAJAS DEL SISTEMA RETRACTIL

Sistema manual (Caleación):

Limpieza : 3 veces al día

Durabilidad electrodo : 3 meses

Sistema retráctil (Caleación)

Limpieza a cada 3 horas por 60 seg.

Durabilidad electrodo : 1 año

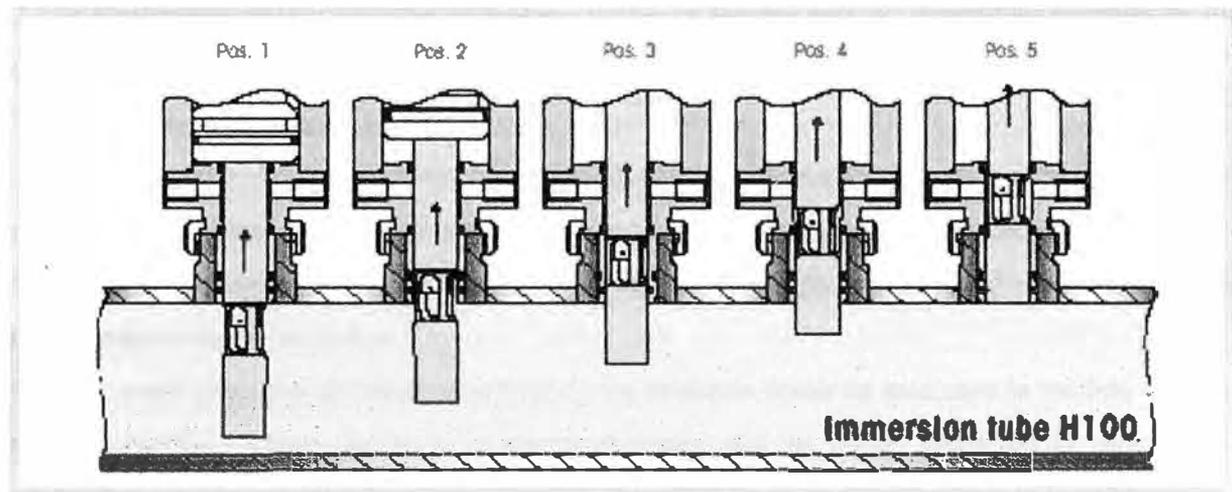


Fig. 5.2 Sistema de lavado automático

CONCLUSIONES

1. La medición de pH mediante medidores portátiles o papel de tornasol solo se puede considerar como referencial; en el caso que nos ocupa no permiten garantizar una buena compensación a lo largo del proceso, luego deben ser reemplazados con dispositivos de tecnología actualizada.
2. La medición del pH paralela al proceso hecha en tiempo real, en calidad de variable de línea de producción, permite una supervisión y control más exactos por su carácter automático, libre de los intervalos y manipuleo externo.
3. La aplicación de los sistemas de tecnología actual, al la realización de tareas rutinarias de la producción, permite optimizar el funcionamiento de los procesos, el control económico del uso de los recursos y sobre todo la obtención de un producto de alta calidad con características homogéneas a menores costos.
4. La automatización de tareas sensibles de los procesos como en este caso la medida del pH es muy importante, porque fuera de la mayor precisión que se puede lograr en la captación del parámetro, permite una mayor sensibilidad en el control de la compensación o la neutralización de la solución, asimismo nos permite ahorrar costos de producción.

ANEXO A
INTRODUCCION A LOS AUTOMATISMOS

INTRODUCCIÓN A LOS AUTOMATISMOS

1.1. Antecedentes históricos

El término autómeta se ha venido aplicando desde tiempo muy antiguo a aquella clase de máquinas en las que una fuente de energía accionaba un mecanismo ingeniosamente combinado, permitiendo imitar los movimientos de los seres animados.

Ateniéndonos a esta primera acepción, entre los primeros autómetas de los que se tiene noticia, se citan las estatuas animadas que habrían sido construidas en el templo de Dédalo. Los griegos, y más tarde los romanos, conocieron ya varios tipos de juguetes mecánicos. Al parecer algunos famosos autómetas fueron construidos en la edad media por San Alberto Magno o Regiomontano (Juan Muller).

Mención especial merece Vaucanson, el cual construyó en su juventud «sublimes juguetes»: entre ellos el Flautista, que representaba un fauno según modelo de la estatua de Coysevox, que ejecutaba una docena de aires valiéndose de movimientos de la lengua, labios y dedos; el Tamborilero; la Tañedora, que todavía puede ser admirada en el conservatorio de artes y oficios de París; y un áspid, que se utilizó en las representaciones de la Cleopatra de Marmontel. Sin embargo, la fama de Vaucanson se debe sobre todo a su célebre Pato, el cual era capaz de batir las alas, zambullirse, nadar, tragar grano e incluso expeler un producto parecido al excremento. Al parecer una sola de sus alas se componía de unas 2000 piezas. No obstante, en todos esos autómetas no se trataba de copiar la vida, sino únicamente de imitar algunos de sus actos aislados.

En todos los autómetas celebres del s. XVIII se repite el proceso de imitación, pudiéndose citar, entre ellos: las Cabezas parlantes del abate Mical; el Androide escritor que Frederic de Knauss presentó en Viena, en 1760; los autómetas expuestos en Francia y en Suiza por los hermanos Droz; los relojes de Lyon y Cambrai, y el de Estrasburgo, debido a Schwilgue (1842), así como los numerosos relojes de péndola. animadores de autómetas, originales de artesanos rusos, que todavía hoy pueden admirarse en las vitrinas del Kremlin; de Robert Houdin merecen especial mención: el Escamoteador, el Volatinero, el Pájaro cantor, el Escritor dibujante, el Pastelero, etc.

Durante mucho tiempo existió un autómeta que tuvo intrigada a la opinión: el Jugador de ajedrez, de Kempelen, que consistía en una especie de caja con un tablero encima, ante el cual un autómeta movía las piezas frente a un contrincante humano. Ese jugador ganaba de manera casi sistemática; resulta pues seguro que un experto jugador se hallaba oculto dentro de la caja.

El desarrollo de la electricidad y de la electrónica permitió la aparición de una nueva generación de autómatas, capaces de imitar realmente algunas funciones intelectuales y no sólo de reproducir determinados comportamientos. Ya en 1912, el jugador de ajedrez eléctrico de Torres Quevedo era capaz de jugar finales de partida (rey contra rey y torre). El jugador de Nim, construido en 1951 en la universidad de Manchester, y citado repetidas veces, constituye otro ejemplo de un autómata muy elemental, dado que existe un algoritmo que permite ganar con seguridad en este juego. Por aquella misma época Strachey construyó en E.E.U.U. un jugador de damas capaz de enfrentarse con un buen jugador; para ello la máquina debe analizar las consecuencias de todas las jugadas posibles a partir de una situación dada, y esto con varias jugadas de antelación. Los adelantos de la microelectrónica propiciaron la aparición en el mercado norteamericano, en 1977, de un jugador de ajedrez capaz de desarrollar un juego de nivel muy aceptable por un precio relativamente módico.

Resultaría pues factible en la actualidad construir un autentico jugador de ajedrez androide. La industria utiliza autómatas, denominados robots, capaces de llevar a cabo manipulaciones así, como operaciones de montaje y de ensamblaje.

1.2. Los fundamentos modernos de la Automática

La era moderna de la automatización comienza con la aparición, en 1775 de la máquina de vapor de simple efecto inventada por James Watt. La máquina de doble efecto de 1784 estaba provista de dos automatismos: el distribuidor de vapor y el regulador de bolas, que mantenía constante la velocidad del árbol de salida a pesar de las fluctuaciones de la carga.

Es el contexto actual, la AUTOMÁTICA se define como la Ciencia y Técnica de la automatización, que agrupa el conjunto de las disciplinas teóricas y tecnológicas que intervienen en la concepción, la construcción y el empleo de los sistemas automáticos. La automática constituye el aspecto teórico de la cibernética. Está estrechamente vinculada con las matemáticas, la estadística, la teoría de la información, la informática y técnicas de la ingeniería.

Podría realizarse una distinción entre: la automática teórica, conjunto de los métodos matemáticos de análisis y de síntesis de los sistemas automáticos y de sus elementos; y la automática aplicada, que trata más específica mente de. los problemas prácticos de automatización, que concierne a la teoría y a la tecnología de los captadores, los accionadores y los ordenadores.

El funcionamiento de todo sistema automático se asienta en la confrontación de una información de mando, que describe el programa deseado, con una información de estado, confrontación de la que se derivan las órdenes de mando que han de darse a los accionadores que actúan sobre el sistema, modificando así su estado. Esta sucesión de operaciones se suceden en una estructura de bucle cerrado, donde un centro de operaciones de mando y de control, asegura el buen comportamiento de la instalación.

Basados en el concepto matemático de autómeta, es decir, el ente constituido por un conjunto de reglas que definen estados y condiciones de cambio de estado, en los automatismos secuenciales, de los que el ascensor constituye uno de los ejemplos clásicos, la información de estado viene proporcionada generalmente por captadores binarios. y el tratamiento de la información es de naturaleza lógica. El programa está constituido por una sucesión, o secuencia, de fases operatorias enlazadas unas con otras según un conjunto de reglas lógicas. Esos sistemas constituyen la inmensa mayoría de los automatismos industriales, especialmente los dedicados a la automatización de la fabricación. Los ordenadores, constituyen sin duda una de las formas más sofisticadas de los automatismos secuenciales.

En los servosistemas, la información de estado adopta la forma de una o varias magnitudes que caracterizan el estado del sistema. La energía comunicada a los accionadores se dosifica según las diferencias entre esas magnitudes y los valores deseados, y el bucle de control actúa en tanto que un sistema de cero automático, tiende constantemente a anular la diferencia entre el valor actual y el estado deseado. Este principio de estado de dependencia tiende a reducir la influencia de las perturbaciones exteriores. En los reguladores de sostenimiento, una magnitud regulada está obligada a conservar lo mejor posible un valor asignado a pesar de las perturbaciones, en tanto que en los servomecanismos o reguladores de correspondencia, una magnitud de salida debe amoldarse lo mejor posible a las evoluciones de una magnitud de entrada.

Los sistemas adaptativos poseen, además de la facultad de la autocorrección de las variaciones de una serie de parámetros, una facultad de autorregulación que les permite funcionar correctamente en condiciones exteriores muy diversas. La resistencia a las perturbaciones y a las fluctuaciones del entorno se ve así incrementada.

Otros son los denominados sistemas autodidácticos, en los que el programa de tratamiento de la información se elabora y se perfecciona en curso de funcionamiento por autoaprendizaje bajo la dirección de un superprograma. Este principio se aplica entre otros

a la identificación automática de formas y de los sonidos

En suma, los automatismos abarcan a los automatismos secuenciales, los servosistemas, los sistemas adaptativos y los sistemas con autoaprendizaje.

1.2.1. El automatismo secuencial

En el contexto del presente curso, nos merece especial atención los Automatismos Secuenciales. Un automatismo *secuenciales*, es un sistema cuyo funcionamiento emplea una secuencia de fases claramente diferenciadas, según un conjunto de reglas preestablecidas. En el caso más sencillo, el final de cada fase detectado por un captador apropiado, da paso al inicio de la fase siguiente. Las condiciones de transición entre fases adoptan la forma de condiciones lógicas más o menos complejas provocando cambios de estado del sistema controlado. Los automatismos secuenciales pueden funcionar ya sea sobre la base de la lógica cableada, de forma específica mediante los denominados armarios de relés, que ha sido en el periodo histórico anterior más reciente la implementación más usual de un gran número de instalaciones industriales, ya sea sobre la base de un programa registrado mediante ordenadores, autómatas programables o sistemas basados en microprocesador.

El concepto de automatización lleva implícita la supresión total o parcial de la intervención humana en la ejecución de diversas tareas, industriales, agrícolas, domésticas, administrativas o científicas. Se aplica la automatización tanto a las tareas más sencillas, tales como la regulación de la temperatura de un horno o el mando secuencial de una máquina herramienta, como a las más complejas, tales como la dirección mediante ordenador de una unidad química o la gestión automatizada de un establecimiento bancario.

Al confiar a órganos tecnológicos todas o parte de las funciones intelectuales que intervienen en la conducción de un proceso, la automatización se sitúa en un nivel superior al de la mera mecanización. En la actualidad los problemas de automatización industrial y administrativa se confían respectivamente a los especialistas en automática e informática, a los que se unen los especialistas del proceso por automatizar, que constituyen así un equipo pluridisciplinar. La automatización de un proceso se sitúa en un marco técnico-económico del que no constituye más que uno de sus aspectos.

La automatización en el contexto histórico más reciente, no solamente esta relacionada con el proceso mismo, sino también con la distribución de los productos fabricados o con la prestación de servicios. Forma parte integrante de la concepción y de la gestión de los

grandes complejos industriales, administrativos y comerciales. La automatización constituye, particularmente, uno de los factores de aumento de la productividad y de mejora de la calidad.

Los principales componentes de la automatización son los transductores y los captadores de información, los preaccionadores (relés, contadores etc.) y accionadores (motores, órganos desplazamiento lineal etc.), así como los órganos de tratamiento de la información, en particular los ordenadores y en general los sistemas basados en el microprocesador. Su naturaleza depende de la del sistema contemplado, automatismo secuencial o servosistema.

En un número creciente de instalaciones industriales un ordenador se encarga de cálculos de balances de energía o de materias, de la vigilancia de las magnitudes que pueden llegar a adquirir valores peligrosos, del comportamiento secuencial del arranque y de la detención, de cálculos sobre las medidas, etc. El ordenador puede, asimismo, llevar a cabo cálculos de auto adaptación y de auto optimización; las condiciones de funcionamiento óptimo vienen impuestas al proceso, bien indirectamente por intermedio de reguladores clásicos controlados por el ordenador, o bien directamente en el caso de gobierno y control directo.

En los sistemas de control jerarquizado, un ordenador central determina las consignas generales comunicadas a controladores especializados que controlan los diversos elementos de la instalación. Semejante estructura descentralizada aprovecha plenamente las inmensas posibilidades brindadas por los microprocesadores. Incluso en el campo de las fabricaciones mecánicas, en el que la mayoría de los automatismos son de tipo secuencial, el ordenador ha hecho su aparición bajo la forma de los controladores numéricos de máquinas herramienta que permiten ordenar la elección, el cambio y el recorrido de las herramientas merced a un programa registrado en la memoria del ordenador.

1.3. Modelo estructural de un Sistema Automatizado

La estructura de un Sistema Automatizado puede clasificarse en dos partes claramente diferenciadas: por un lado lo que denominaremos *Parte Operativa*, formada por un conjunto de dispositivos, máquinas o subprocesos, diseñados para la realización de determinadas funciones de fabricación; de forma específica pueden tratarse de máquinas herramienta para la realización de operaciones de mecanizado más o menos sofisticadas o bien de subprocesos dedicados a tareas tales como destilación, fundición etc. Por otro lado tenemos la Parte de Control o Mando, que, independientemente de su implementación

tecnológica electrónica, neumática, hidráulica etc., es el dispositivo encargado de realizar la coordinación de las distintas operaciones encaminadas a mantener a la Parte Operativa bajo control.

El sometimiento de la Parte Operativa se logra mediante el mantenimiento continuo de un intercambio de información entre la primera y la Parte de Control o mando. Dicho intercambio se establece a través de los captadores binarios, transductores analógicos y digitales y los dispositivos de preaccionamiento. A partir de los dos primeros se recoge información de los valores de las magnitudes físicas a controlar, así como de sus cambios de estado, enviando dicha información a la Parte de Control para su tratamiento. Tras el tratamiento de la información se envían acciones de mando a través de los preaccionadores. Los preaccionadores son dispositivos que permiten el control de grandes potencias mediante las señales de pequeña potencia que son emitidas por la Parte de Control.

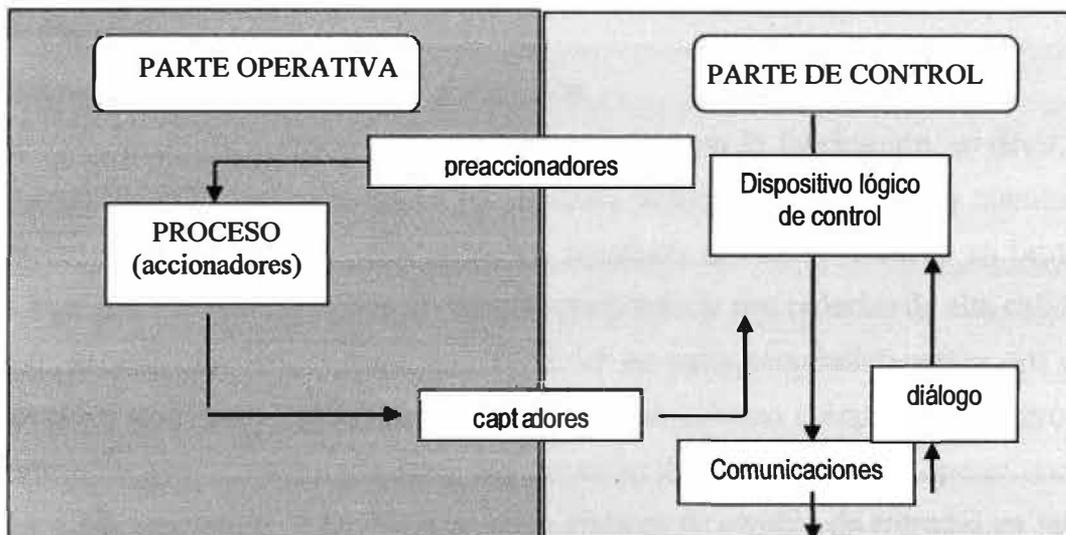


Fig. A.I.1 Modelo estructural de un sistema automatizado

En suma, la automatización de un proceso industrial, (máquina, conjunto o equipo industrial) consiste en la incorporación al mismo de un conjunto de elementos y dispositivos tecnológicos que aseguren su control y buen comportamiento.

Uno de los objetivos deseables es que el automatismo sea capaz de reaccionar frente a las situaciones previstas de antemano y también que, frente a imponderables, tenga como objetivo situar al proceso y a los recursos humanos que lo asisten en la situación más favorable.

En el periodo histórico más reciente los objetivos de la automatización han sido el procurar reducción de costes de fabricación, una calidad constante en los medios de producción y liberar al ser humano de las tareas tediosas, peligrosas o insalubres.

Sin embargo, desde los años 60, debido a la alta competitividad empresarial y a la

internacionalización creciente de los mercados, estos objetivos han sido ampliamente incrementados.

Como consecuencia de un entorno competitivo, cualquier empresa se ve sometida a la necesidad de acometer grandes y rápidos procesos de cambio en búsqueda de su adecuación a las demandas de mercado, neutralización de los avances de su competencia o simplemente como maniobra de cambio de estrategia al verse acortado el ciclo de vida de alguno de sus productos.

Ello obliga a mantener medios de producción adecuados que posean una gran flexibilidad y puedan modificar oportunamente la estrategia de producción.

La aparición de la microelectrónica y el computador ha tenido como consecuencia el que sean posibles mayores niveles de integración entre el sistema productivo y los centros de decisión y política empresarial, permitiendo que la producción pueda ser contemplada como un flujo de material a través del Sistema Productivo que interacciona con todas las áreas de la empresa.

1.3.1. Parte operativa: Sistemas de Fabricación

En esta sección discutimos algunos conceptos asociados con la fabricación, es decir, con la Parte Operativa. Estos son aplicables a los sistemas de fabricación discreta y continua.

La fabricación es un proceso de transformación mediante el cual el material en bruto, el trabajo, la energía, y el equipamiento se reúnen para producir mercaderías de alta calidad.

Obviamente, las mercaderías producidas deben tener un valor económico mayor que el de los componentes utilizados y deben ser vendibles en un entorno competitivo. El proceso de transformación generalmente conlleva una sucesión de pasos llamados operaciones de producción. Cada operación de producción es un proceso de cambio de entradas en salidas mediante la aportación de un valor añadido.

Esparcidas entre las operaciones que añaden valor están las que no añaden ningún valor, tales como el transporte, el almacenamiento e inspección. En general es necesario minimizar, si no eliminar, las operaciones que no añaden valor.

a) Modelo de Entrada-Salida

Un sistema de fabricación puede ser representado por el modelo de entrada-salida mostrado en la Figura En éste, las entradas están constituidas por material, trabajo, energía, y tecnología. El material en bruto se convierte en el producto final de calidad. Son diversas las operaciones de trabajo desarrolladas por los denominados trabajadores de cuello-azul y de cuello-blanco necesarias para el diseño del producto, para operar sobre el equipo, para la carga y descarga de las piezas, la inspección etc. La tendencia reciente es automatizar la mayoría de estas funciones y elevar el papel del operador humano al de

monitor y supervisor.

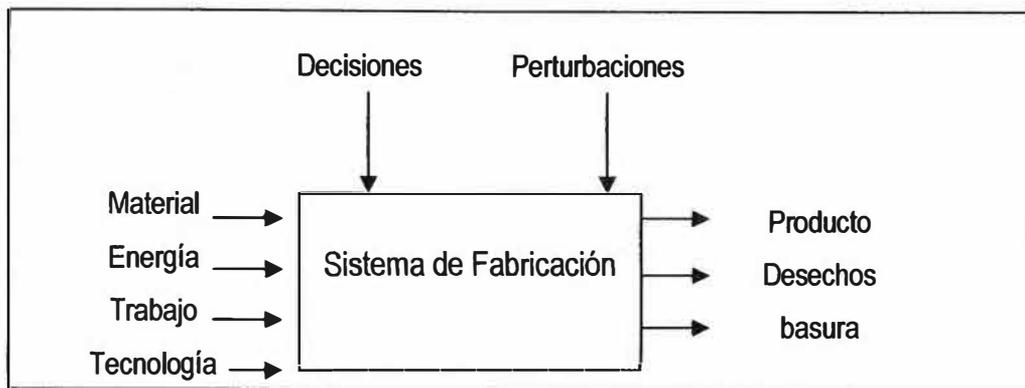


Fig. A.I.2 Sistema de Fabricación: Modelo de entradas y Salidas

La tecnología de la fabricación representa la sofisticación y flexibilidad del equipamiento, y el objetivo de la integración del flujo de material y la información en el sistema. Un sistema de fabricación puede ser manual o totalmente automatizado, altamente dedicado o totalmente flexible, un conjunto de máquinas-herramienta aisladas. o un sistema de producción totalmente integrado. Es el nivel de tecnología lo que determina si un sistema es un sistema de fabricación en serie, un taller de trabajo (Job Shop), un sistema de producción por lotes, o un sistema totalmente flexible de fabricación. La tecnología también determina si las economías son del tipo de escala o del tipo de alcance. La fabricación en serie de una estrecha gama de productos conduce a economías de escala mientras que un bajo volumen de producción de una variedad amplia de productos se asocia a economías de alcance.

El proceso de fabricación produce tres rendimientos: la pieza completa, Con una calidad de producto que debe satisfacer las especificaciones de ingeniería requeridas; chatarra y desperdicios. La chatarra es inevitable debido a las operaciones de mecanizado del metal. El desperdicio es de dos tipos: el primer tipo de desperdicios es representado por las herramientas gastadas, el producto rechazado durante la inspección, etc.; y el segundo tipo de desperdicio es generado por el uso de los recursos del sistema en operaciones que no agregan valor. Por supuesto, chatarras y desperdicios son salidas del modelo indeseables y que deben minimizarse.

Hay dos aportaciones más al sistema de fabricación que son importantes para su funcionamiento. El primero es el conjunto de decisiones que se realizan en los diversos niveles de la jerarquía (de largo alcance, medio alcance, y corto alcance) con respecto a productos fabricados, equipos comprados, esquemas y disposiciones de planta, secuenciación y programación de piezas, carga de piezas, etc. Estas decisiones son muy

importantes y la meta principal del planteamiento es presentar herramientas actuales para evaluar por medios analíticos las diversas decisiones. El segundo tipo de entradas son las perturbaciones; en éstas se incluyen las acciones de los gobiernos, fluctuaciones de mercado, la competitividad, las averías del equipamiento y los problemas laborales.

b) Las decisiones en el mundo de la fabricación

La toma de decisiones en un ambiente de fabricación puede ser muy compleja. a causa de las alternativas .disponibles y la naturaleza seria e .incierto del resultado de las decisiones. Hay tres niveles de decisión en un sistema de fabricación: estratégico, táctico, y operacional. Las decisiones estratégicas son a largo plazo (típicamente años) y determinadas por la competitividad y supervivencia de la firma. En éstas se incluyen la introducción de nueva tecnología, mezclas y cambios de piezas (destinando un nuevo tipo de pieza para la producción), la expansión y modificación de sistema (agregando un nuevo centro de máquinas o cambiando el esquema del sistema de manipulación de material), etc. Las de segundo nivel, o las decisiones tácticas, tienen un horizonte de semanas/días. En estas se incluyen la división del objetivo total de producción en lotes, tomar en cuenta la disponibilidad de los materiales en bruto, herramientas, y fechas vencidas. Aquí las cuestiones que se plantean son: (i) cuántos lotes y (ii) cuántas piezas en cada lote. El objetivo es aumentar al máximo la utilización de las máquinas, al tiempo que se obtiene un balance de la carga de trabajo sobre el sistema, para que todas las máquinas terminen su trabajo para cada lote casi simultáneamente. El nivel operacional o tercer nivel de las decisiones se ocupa del control cotidiano de las operaciones de fabricación. En éstas se incluyen:

- (i) Qué tipo de piezas introducir en el sistema
- (ii) Cuántas piezas deben coexistir en el sistema simultáneamente
- (iii) Qué pieza debería cargarse en la máquina a continuación
- (iv) Cuántas herramientas de cada tipo
- (v) Cómo reaccionar a la rotura de la. Herramienta
- (vi) Reprogramación en el caso de fallos de las máquinas o del sistema de manejo de material.

La gestión efectiva de la fabricación conlleva la dirección simultánea de los tres niveles de decisión. Los fallos en su realización reducirán la eficacia de gestión, conduciendo a costos más altos y reduciendo la competitividad.

El propósito definitivo de la fabricación es centrar los recursos de la organización, capacidades, y energías hacia la consecución de ventajas sostenidas sobre sus competidores. Tal ventaja puede derivarse de costos inferiores de una mayor calidad de producto, de productos más innovadores, o de un servicio superior.

1.3.2. Tipos de Plantas de Producción

La fabricación es un término muy amplio e incluye muchos tipos de productos y operaciones de producción claramente diferentes. Puede suponer muchas formas tecnológicas y orgánicas. Sin embargo, es posible reconocer fundamentalmente las cuatro configuraciones siguientes teniendo en cuenta el número de productos y volumen:

- Procesos de flujo continuo,
- Job Shops
- Producción por lotes, y
- Líneas dedicadas de producción.

a) Procesos de flujo continuo

En éstos se desarrolla una producción dedicada continua de grandes cantidades de producto. Aquí los tipos de producto son pocos y los volúmenes son altos. El proceso de fabricación mantiene un flujo continuo de materiales en bruto mediante una serie de operaciones secuenciales. Estas operaciones transforman los materiales en bruto en un producto final. Entre los ejemplos típicos de los procesos de flujo continuo se incluyen plantas químicas, refinerías de petróleo, plástico, planchas y acero, e industrias textiles.

Mientras que la continuidad completa es rara, suele ser más frecuente un sistema de tipo pipeline donde cada sección de la planta procesa una cierta cantidad de materiales y la pasa a la próxima sección. Para aumentar al máximo el rendimiento total se utilizan técnicas de control realimentado de sección o de planta. La disponibilidad de sensores inteligentes, de tecnología basada en el computador relativamente barata, y un control por computador sofisticado ha tenido como consecuencia fábricas totalmente automatizadas que funcionan virtualmente sin intervención humana.

b) Job Shop

El trabajo en los Job Shop viene caracterizado por unos volúmenes de producción bajos a medios y una amplia gama de productos. Es muy común en industrias mecánicas de ingeniería. Este tipo de fabricación se usa generalmente para pedidos específicos de cliente en el que existe una gran variedad de trabajo a realizar en la planta. Por lo tanto, el equipo de producción debe ser de propósito general y flexible para hacer posible esta variedad de trabajo, y los trabajadores deben ser de gran capacitación para desempeñar la gama de cometidos de trabajo. Los ejemplos típicos de fabricación que se incluyen son los vehículos espaciales, aeronaves, proyectiles, máquinas herramienta, y prototipos de futuros productos.

Los Job Shops generalmente son poco eficientes y tienen grandes tiempos de preparación, grandes inventarios de trabajo en curso, y costos altos. Las razones que lo provocan son:

- Una orden para un componente o submontaje comúnmente involucra operaciones en varias máquinas-herramienta diferentes y con movimientos de una sola pieza. El movimiento de material generalmente es realizado por trabajadores de cuello azul que tienen en consecuencia costos altos y grandes demoras.
- El equipo y herramientas en un Job Shop son de propósito general y puede establecerse para casi cualquier pieza, pero el tiempo para la estructuración de un trabajo particular sobre una máquina herramienta de propósito general puede requerir horas o incluso días.
- Estos productos tienen unos desarrollos y tiempos de producción muy grandes, a causa de la fuerte componente de trabajo de ingeniería, tiempo de diseño y grandes tiempos de preparación para la adquisición de materiales y componentes especiales. También tienen un costo alto a causa del gran contenido de diseño e ingeniería por pedido, que es la fuerza de trabajo más calificada y mejor pagada, y consiguientemente de menor curva de aprendizaje de productividad.

c) La producción por lotes

En esta categoría se plantea la fabricación de lotes de tamaño medio del mismo artículo o' producto. Los lotes suelen ser producidos una sola vez o deben producirse a intervalos regulares. Los tamaños de lotes y la frecuencia de producción de un artículo único se fijan con las políticas de control de inventario adoptadas en marketing.

Aquí nuevamente el equipo de fabricación es de propósito general, pero diseñado para promedios de producción más altos. Las plantas de producción por lotes incluyen los talleres de mecanizado, fundiciones, fábricas de moldeado plástico, y talleres de trabajos de prensa. Entre los artículos realizados en talleres de fabricación por lotes se encuentran muebles, libros, y aparatos domésticos. Se ha estimado que como mucho el 75% de toda la fabricación por lotes está hecha en tamaños de lote de 50 piezas o menos. En la actualidad la fabricación por lotes y la producción Job Shop constituye una parte importante de la actividad total de fabricación.

d) Líneas Dedicadas de alto volumen de producción

Esta es una fabricación especializada continua de productos idénticos. Las líneas de producción de alto volumen son caracterizadas por una tasa de producción muy alta y de estrecho alcance. El equipo se dedica a la fabricación de un tipo de producto único tal

como automóvil, bombillas, aparatos, etc. La planta entera se diseña y opera para la fabricación de un tipo único de producto.

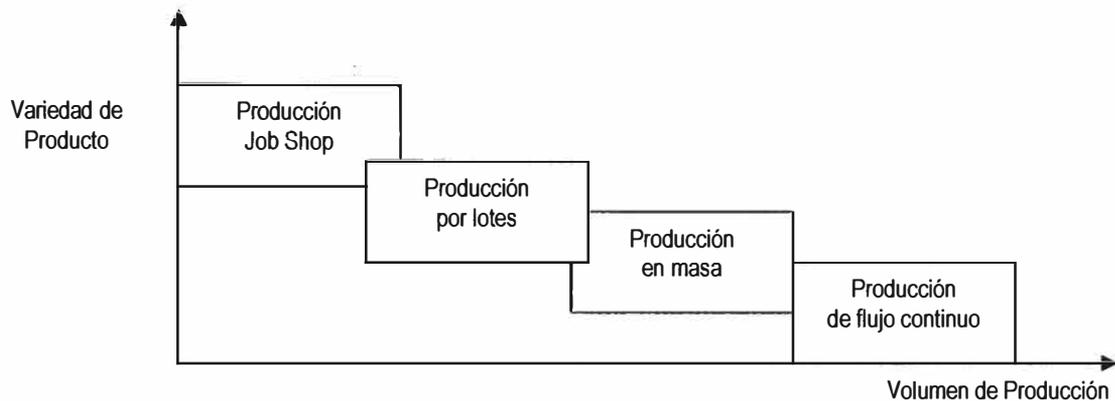


Fig. A.I.3 Cuatro tipos de configuraciones de planta

Para los sistemas e instalaciones especializadas de monoproducto se requiere una inversión fija muy alta, tales como líneas fijas de transporte, transportadores dedicados, almacenes, etc. Cada pieza del equipo se perfecciona desde el punto de vista del costo y el tiempo para la operación que desempeña y el movimiento del material se automatiza.

Los cuatro tipos de las configuraciones de planta pueden ser distinguidas por la variedad del producto y el volumen de la producción. Esta se muestra en la Fig. Hay algunos solapamientos en la clasificación, como indica la figura.

1.3.3. Tipos de disposiciones en planta

El concepto de disposición de planta viene referido al tipo de reordenamiento de los dispositivos físicos e instalaciones de producción en planta. Probablemente la mejor disposición en planta, para un sistema de producción en masa o de flujo continuo no sea adecuada para un sistema tipo Job Shop. Básicamente existen cuatro tipos de disposiciones en planta asociados con los sistemas tradicionales de producción. Estos son:

- Disposición de Posición Fija
- Disposición de Proceso
- Disposición de flujo de producto
- Disposición por tecnología de grupo

a) Disposición de posición fija

En esta disposición el concepto de "posición fija", viene referido al producto. A causa de su peso y tamaño, el producto permanece en un sitio concreto y el equipamiento para su fabricación se lleva a ese punto. Ejemplos de este tipo de disposición son la construcción

de buques y la industria aeronaval, aeroespacial etc.

Otra disposición similar a la anterior es la de disposición de proyecto. Esta se utiliza en la construcción de edificios, puentes y pantanos. Al igual que el tipo de disposición fija, el tipo de producto es muy grande y el equipamiento debe ser desplazado hasta el punto donde se ubica éste. Sin embargo, al contrario que el de disposición fija, cuando el proyecto finaliza el equipamiento también es retirado de dicho punto.

b) Disposición de proceso

En esta configuración las máquinas de producción se ordenan en grupos de acuerdo con el tipo general de proceso de manufacturación. En ésta, los tornos están en un departamento, las máquinas taladradoras están en otro, el moldeo por inyección de plásticos en otro diferente, etc. La ventaja de esta disposición radica en la flexibilidad. Diferentes piezas, con necesidades de mecanizado distintas, pueden ser encaminadas a los diferentes departamentos de manera apropiada mediante carretillas elevadoras o manuales. Esta disposición es típica de los Talleres de Trabajo (Job Shops) y de la fabricación por lotes.

c) Disposición de flujo de producto

Esta disposición es conveniente para la fabricación especializada de un monoproducto, o de grandes volúmenes de un único producto. En este tipo de fabricación conviene organizar la reordenación de las instalaciones lo más eficientemente posible. Para productos de ensamblaje complejo o artículos con una larga secuencia de pequeñas operaciones, ésta es la disposición más conveniente. En este tipo de disposición, las instalaciones de procesamiento y montaje se sitúan a lo largo de la línea de flujo del producto. El trabajo en curso se traslada mediante cintas transportadoras o medios similares desde una estación de trabajo a la otra. En este tipo de disposición, la ordenación de las instalaciones es relativamente inflexible y únicamente se modifica cuando las cantidades a producir justifican las inversiones dedicadas.

d) Disposición por tecnología de grupo

Este intenta combinar la eficacia de la disposición de flujo con la flexibilidad de la disposición de proceso. En esta filosofía se trata de identificar y agrupar familias de piezas con determinada similitud en la fabricación y el diseño. En una planta capaz de producir 10.000 piezas diferentes, puede ser posible agruparlas en grupos de 50 familias con las similitudes anteriormente referidas, de tal forma que el procesamiento de cada miembro de una misma familia puede ser similar, resultando una mayor eficacia en la fabricación. Esta eficacia puede obtenerse mediante la organización del equipamiento en grupos de

máquinas o células que faciliten el flujo de trabajo. En el diseño del producto existen también ventajas en la clasificación y en la codificación de las piezas.

1.4. Parte de Control

La lógica de Control o Mando es el dispositivo encargado de realizar el control coordinador de las distintas operaciones encaminadas a mantener la Parte Operativa bajo un determinado funcionamiento preestablecido de antemano en las especificaciones de diseño.

Con un mayor grado de especificidad, las funciones más comunes del Control son:

- Gestión de las entradas/salidas.
- Tratamiento de ecuaciones lógicas.
- Tratamiento de funciones de seguridad. · Tratamiento secuencial.
- Funciones de regulación.
- Funciones de cálculo para la optimización. · Gestión de herramientas.
- Control de calidad.
- Gestión de mantenimiento.
- Operaciones de Supervisión: monitorización y diagnóstico de fallos.
- Seguimiento de la producción.

1.4.1. Clasificación tecnológica

El desarrollo de los controladores, su complejidad y eficacia, ha ido asociado al desarrollo tecnológico experimentado a lo largo de los tiempos. Básicamente se puede establecer la clasificación mostrada en el cuadro siguiente, partiendo de dos conceptos principales: lógica cableada y lógica programada.

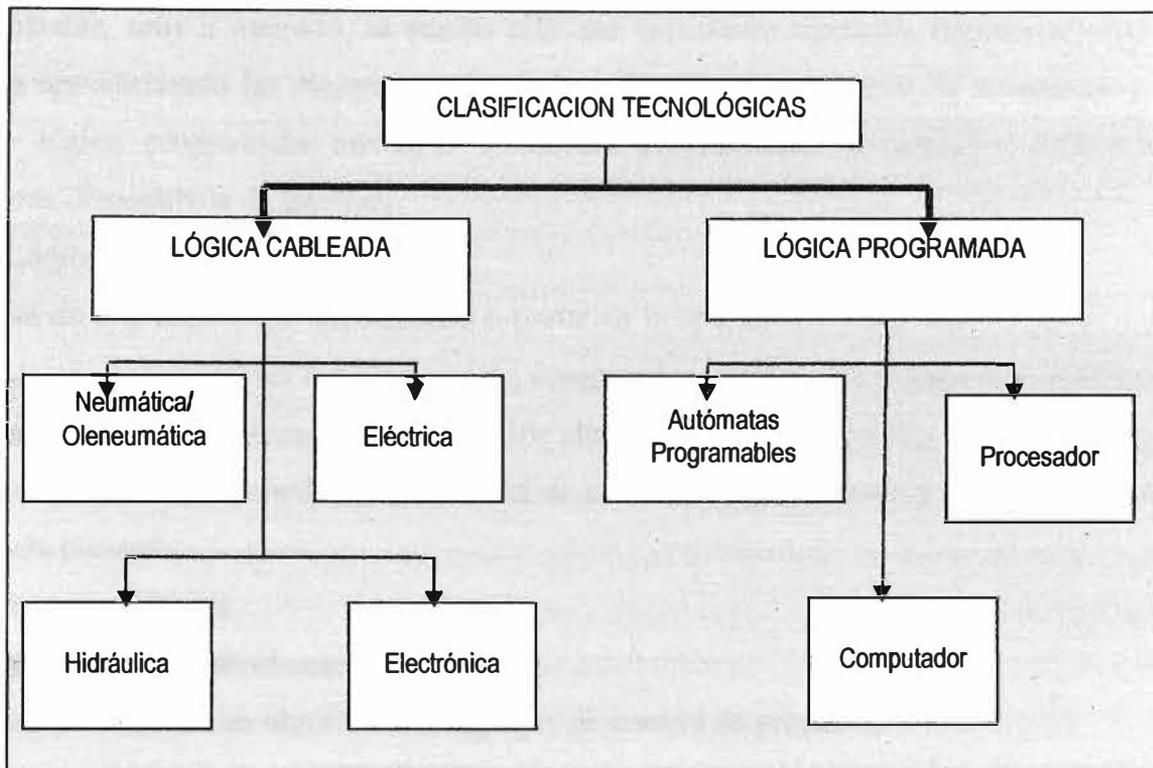


Fig. A.I.4 Clasificación Tecnológica

a) Lógica cableada

Su denominación viene dada por el tipo de elementos que intervienen en su implementación. En el caso de la tecnología eléctrica, las uniones físicas se realizan mediante cables eléctricos, relés electromagnéticos, interruptores, pulsadores etc. En lo que respecta a la tecnología electrónica, las puertas lógicas son los elementos fundamentales mediante los cuales se realizan los controladores.

En el caso de la tecnología fluidica, su implementación viene siendo efectuada por tuberías de acero, cobre, pvc, etc. junto con elementos tales como válvulas, distribuidores, presostatos, nanorreductores, etc.

La tecnología neumática ha sido, y es aún frecuentemente utilizada, en los automatismos industriales, aunque va quedando relegada a los accionamientos de cierta potencia con algoritmos de control relativamente simples y también para aplicaciones de carácter especial (para ambientes explosivos), ya que frente a la lógica programada presenta los siguientes inconvenientes:

- Imposibilidad de realización de funciones complejas de control.
- Gran volumen y peso.
- Escasa flexibilidad frente a modificaciones.
- Reparaciones costosas.

No obstante, muy a menudo, se suelen articular soluciones mediante implementaciones mixtas aprovechando las mejores características de ambas tecnologías, la neumática y la de la lógica programada mediante autómatas programables industriales conectados mediante dispositivos de interfaz.

b) Lógica programada

Se trata de una tecnología desarrollada a partir de la aparición del microprocesador, y de los sistemas programables basados en éste, computador, controladores lógicos y autómatas programables. Constantemente, debido a los altos niveles de integración alcanzados en la microelectrónica, el umbral de rentabilidad de esta tecnología decrece y frente a la lógica cableada presenta:

- Gran flexibilidad,
- Posibilidad de cálculo científico e
- Implementación de algoritmos complejos de control de procesos,
- Arquitecturas de control distribuido,
- Comunicaciones y gestión.

Como inconvenientes a corto y medio plazo, presenta la necesidad de formación en las empresas de personal adecuado para su programación y asistencia, al tratarse de verdaderas herramientas informáticas, también su relativa vulnerabilidad frente a las agresivas condiciones del medio industrial, si bien, con el transcurso del tiempo, el nivel de fiabilidad y disponibilidad de estos sistemas se ha mejorado notablemente.

1.5. Niveles de automatización

El grado de automatización de un proceso viene determinado fundamentalmente por factores de tipo económico y tecnológico, por ello podemos encontrar una gama muy amplia y variada, dependiendo de los objetivos a alcanzar

1.5.1. Nivel elemental

Se corresponde con el asignado a una máquina sencilla o parte de una máquina, asignándole tareas de vigilancia de tiempos muertos, posicionamiento de piezas y funciones de Seguridad.

En el nivel elemental, se distinguen tres grados de automatización:

- Vigilancia.
- Guía operador.
- Mando

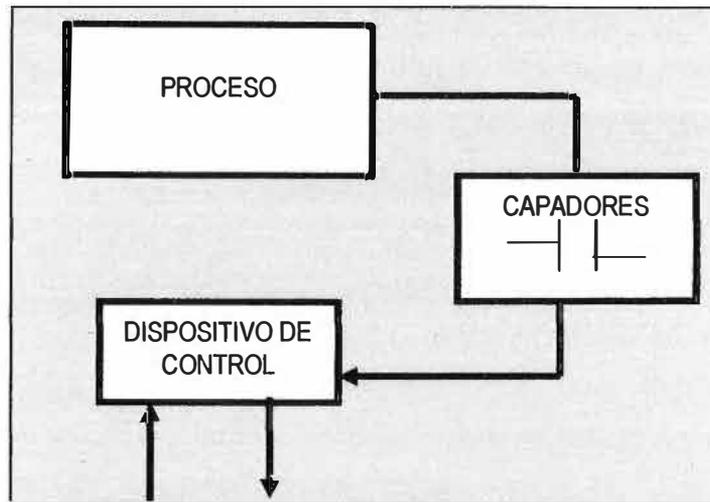


Fig. A.I.5 Nivel de Automatización elemental, bucle abierto.

El modo operación de Vigilancia se realiza en bucle abierto y consiste en la toma por parte del dispositivo automático de medidas a una serie de variables, procesando dicha información y emitiendo partes diarios de servicio y balances.

El modo operación Guía operador consiste en una variante de la anterior de un mayor grado de elaboración, con la inclusión de tareas de asistencia mediante propuestas al operador, según criterios prefijados. Se suele realizar en bucle abierto.

El modo operación de mando consiste en la toma de información, procesamiento, toma de decisiones y ejecución sobre el proceso de acciones de control. Se corresponde con una estructura clásica de bucle cerrado donde la intervención humana queda excluida salvo para las tareas de supervisión.

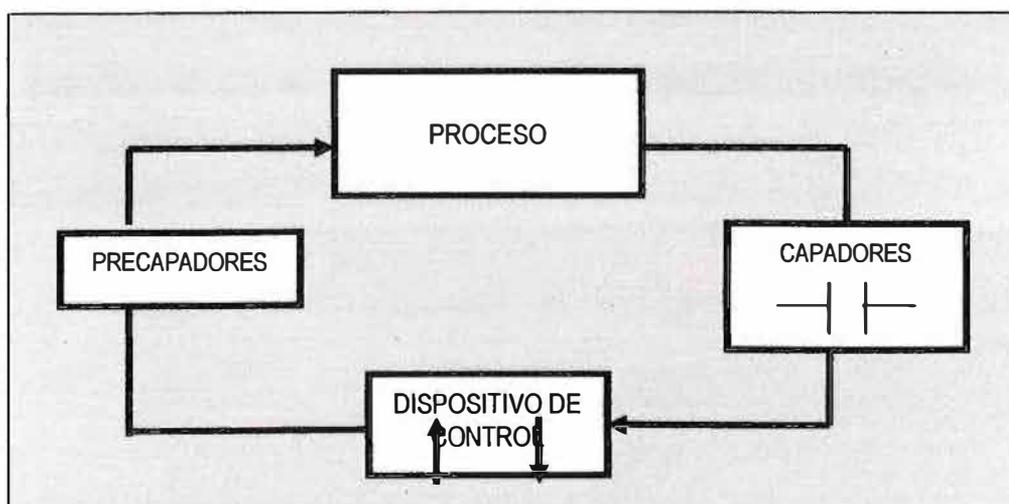


Fig. A.I.6 Nivel de automatización elemental, bucle cerrado.

ANEXO B
AUTÓMATAS PROGRAMABLES INDUSTRIALES

AUTÓMATAS PROGRAMABLES INDUSTRIALES

INTRODUCCIÓN

El concepto de Autómata Programable Industrial (API) surge en la década de los 60, a raíz del proyecto propuesto por la compañía norteamericana General Motors, con objeto de solucionar los problemas de falta de flexibilidad y adaptación del proceso productivo a los nuevos modelos de automóviles que se pretendía introducir en la cadena de producción. Asimismo, otro factor determinante para su desarrollo, fueron los altos costos en las reparaciones y consecuencias, de las paradas por averías de los automatismos basados en armarios de relés.

Al mismo tiempo, y de forma casual, en la empresa Bedford Associates Inc., R.E. Moreley estaba desarrollando un prototipo cuyas especificaciones de diseño coincidían con las de General Motors para el desarrollo del citado proyecto.

- Estas .especificaciones eran:
- Carácter reutilizable.
- Adaptación al agresivo entorno industrial.
- Lenguaje de programación asequible a los técnicos automaticistas eléctricos.
- Fácil mantenimiento.
- Implementación mediante electrónica estática

Los primeros autómatas programables disponían de memoria, basada en núcleos de ferrita de tipo cableado, y su diseño se establecía mediante un computador.

Los primeros autómatas para equipamiento aparecen en 1968, con memoria cableada y una unidad central constituida por circuitos integrados. Este equipamiento se dedica a su utilización para el control de procesos de carácter secuencial, especialmente a las cadenas de montaje, de transporte, de distribución almacenamiento, etc., en suma toda clase de "Operaciones que en el periodo anterior más reciente, eran competencia de los sistemas basados en armarios de relés.

La evolución experimentada a principios de los 70, con la incorporación del microprocesador, hace posible un incremento de las prestaciones originales del Autómata Programable, dotándole de unos elementos de comunicación hombre-máquina más modernos, manipulación de datos, posibilidad de realizar cálculos matemáticos, funciones de comunicación con ordenadores, etc.

Durante la segunda mitad de los 70 se produce un incremento de la capacidad de memoria,

posibilidad de entradas/salidas remotas, analógicas y numéricas, funciones de control de posicionamiento, aparición de lenguajes con mayor número de instrucciones más potentes y, sobre todo, desarrollo de las comunicaciones con periféricos y ordenadores

En este contexto su aplicación se extiende al control de procesos de carácter continuo, ya que se hace posible la comunicación del Autómata con equipos e instrumentación al efecto.

A partir de la década de los 80 la mejora de las prestaciones han venido referidas a la nueva velocidad de respuesta, reducción de las dimensiones, mayor concentración de número de entradas/salidas en los módulos respectivos, desarrollo de módulos de control continuo, PID, servocontroladores, y control inteligente, FUZZY. También mayor capacidad de diagnóstico en el funcionamiento e incremento en los tipos de lenguajes de programación: desde los lenguajes de contactos, lenguajes de funciones lógicas, lista de instrucciones basados en nemotécnicos, flujogramas, lenguajes informáticos, Grafset, etc.

Debido a la alta integración en los circuitos integrados, en la actualidad existen variedades de nanoautómatas, de dimensiones muy reducidas que ha hecho posible su utilización hasta en aplicaciones domésticas, apertura y cierre de puertas, control de iluminación, control de riego de jardines, etc.

Existen básicamente dos criterios para la clasificación de los autómatas programables industriales: por una parte los denominados factores cuantitativos, que tienen en cuenta el número de entradas salidas y la capacidad de memoria; por otra los factores cualitativos, en los que los autómatas programables de una gama baja disponen de funciones para (control de variables discretas, numéricas, aritméticas y de comunicación.

Los autómatas programables industriales de la gama media-alta, disponen además de los referidas anteriormente, capacidad de manipulación de gran cantidad de datos, posibilidad de cálculo matemático complejo, entradas/salidas inteligentes, varios microprocesadores de operación específica, tratamiento de señal, comunicaciones, etc.

Estructura de un Autómata Programable Industrial

Básicamente un API se divide en dos sistemas funcionales principal la unidad central y el sistema de entradas/salidas.

La estructura de los API puede clasificarse, básicamente, atendiendo a los conceptos de:

- Estructura modular .
- Estructura compacta

La estructura modular divide en distintos módulos dedicados las estructuras funcionales

anteriormente referidas, de tal forma que físicamente existen módulos tanto para la CPU, como para los distintos tipos de módulos de entrada / salida.

La principal ventaja de esta disposición radica en la posibilidad de adecuar la arquitectura del sistema a las necesidades estrictas de diseño y funcionamiento. También permite el funcionamiento parcial del sistema en caso de avería al tiempo que hace posible la reducción de los tiempos de reparación de forma "notable, con la sola sustitución del módulo averiado incluso en pleno funcionamiento.

La estructura compacta resulta adecuada para pequeñas aplicaciones con un número prefijado de entradas/salidas. Los denominados nanoautomatas, que son API de muy reducidas dimensiones, adoptan esta estructura. También, y dado el carácter estanco de la carcasa, permite su empleo en ambientes industriales especialmente agresivos

ANEXO C
DISEÑO ESTRUCTURADO

DISEÑO ESTRUCTURADO

INTRODUCCIÓN

Hasta el momento se ha realizado el diseño de los dispositivos de control automático, teniendo en cuenta exclusivamente las necesidades de su funcionamiento de la manera más escueta; es decir, atendiendo al control del funcionamiento normal del automatismo, sin otras consideraciones. Sin embargo, las necesidades de altos niveles de automatización en los procesos, así como la dedicación en especial a tareas de seguridad, vigilancia y autodiagnóstico imponen una complejidad creciente a dichos sistemas, sobre todo en las fases de concepción y de realización.

En estas fases del proceso de diseño, existen toda una serie de conceptos que han de ser tenidos en cuenta si, razonablemente, el objetivo es obtener la máxima disponibilidad y seguridad en el funcionamiento de los sistemas de control automático. Algunos de estos conceptos dependen en ocasiones de la naturaleza misma de dichos sistemas, pero en general existen algunos comunes a casi todos ellos. Estos conceptos son:

- La seguridad: con la posibilidad de efectuar paradas de emergencia. .
- Los modos de marcha del automatismo.

Por tanto, para un análisis más adecuado y comprensión posterior del modelo global de estos sistemas, es conveniente imponer su diseño de forma estructurada teniendo en cuenta los diversos aspectos constitutivos del modelo global.

La estructuración en diversos submodelos permite realizar un diseño más detallado de cada una de las tareas a atender por parte del sistema de control, al tiempo que permite y facilita su representación documentada de forma más comprensible y legible para su posterior modificación o mantenimiento. En el diseño de un sistema cualquiera la jerarquía entre los diversos aspectos del modelo global, como resulta obvio, viene dada por este orden: seguridad, modos de marcha y funcionamiento normal.

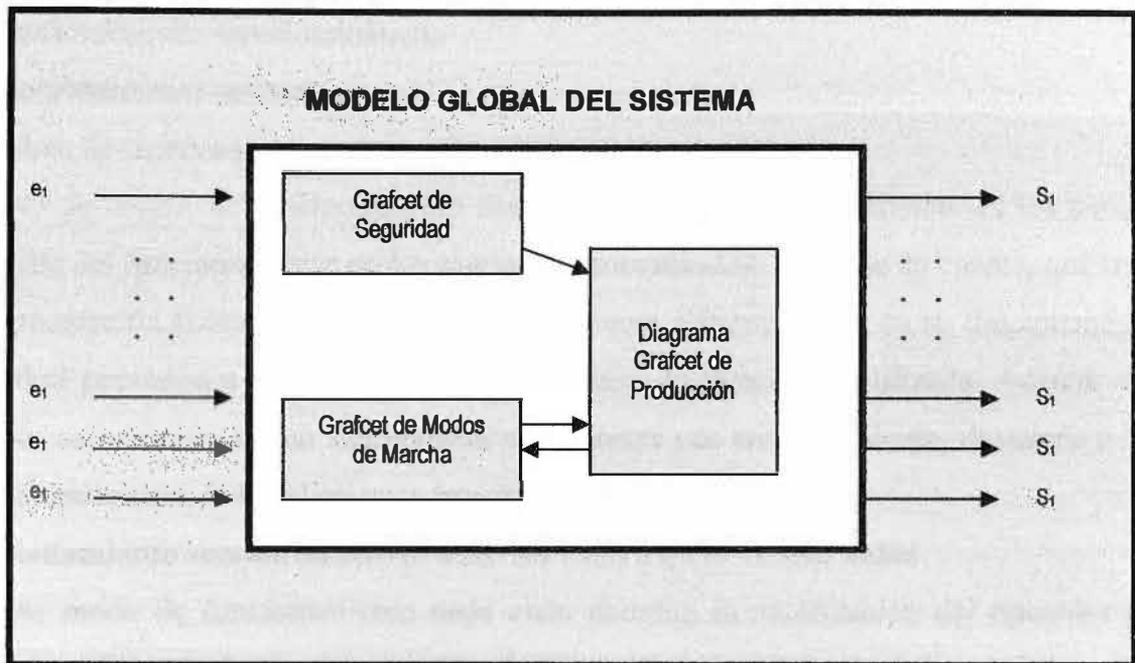


Fig A.III.1. Diversos aspectos del modelo global.

Modos de Marcha

Bajo esta definición se describen los diversos modos de funcionamiento que pueden realizarse en los sistemas automatizados, teniendo en cuenta que estos modos de funcionamiento han sido concebidos y establecidos en la propia fase de diseño del sistema; por lo tanto, se excluyen de esta definición todo comportamiento no determinista del mismo.

El funcionamiento normal del automatismo es generalmente cíclico; y es posible realizar una clasificación del mismo a partir de que el sistema funcione:

- Ejecutando el ciclo de forma indefinida a partir de una autorización del operador.
- Ejecutando el ciclo uno a uno con requerimiento de autorización, por parte del operador, en cada ocasión.
- Ejecutando, por parte del operador, un control permanente permitiendo la activación de una o más etapas en cada autorización.

A partir de los modos de funcionamiento referidos, diversidad de combinaciones podrían realizarse; pero en general los modos de marcha se clasifican en marchas automáticas y marchas de intervención.

Marchas automáticas.

Se trata del modo de funcionamiento normal, para el cual el sistema ha sido diseñado. A su vez pueden clasificarse en:

asociada a la etapa de inicialización.

Para ejercer un control estricto sobre el ciclo y evitar su repetición indeseada, se suele introducir la señal de arranque de ciclo AC mediante flanco de subida, evitando de esta manera su repetición aun en el caso que dicha señal haya quedado activada desde el ciclo precedente. Otra forma utilizada consiste en la introducción de la etapa "anti-repetición", al final de cada ciclo, cuya acción asociada consiste en desactivar la condición de arranque de ciclo AC activada al inicio de ciclo para poder pasar al ciclo siguiente

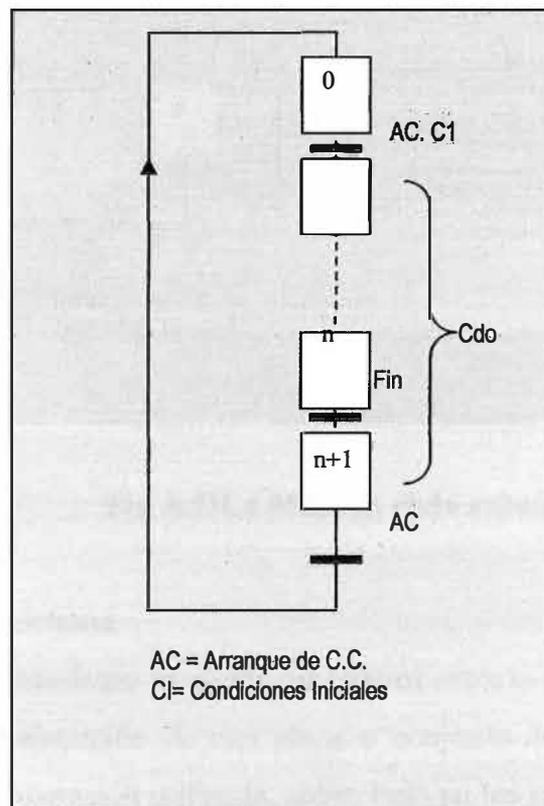


Fig A.III.3 Antirepetición

Funcionamiento Automático: marcha ciclo automático- ciclos continuos

En este modo de funcionamiento, cuando se ejecuta la orden da arranque de ciclo (AC), el sistema permanece funcionando de forma ininterrumpida, hasta que una orden de parada normal, complementaria de In anterior, sea efectuada. La parada normal, en este modo de funcionamiento detiene el sistema al final del ciclo en curso, a diferencia de las paradas de emergencia, cuyo objeto por lo general es parar de inmediato la ejecución del ciclo sea cual sea su situación.

Para el control sobre el ciclo continuo se suele establecer una estructura jerarquizada con dos diagramas Grafset, donde el de orden superior (maestro), controla el funcionamiento del inferior (esclavo).

Otras formas de implementación utilizan la información suministrada por un conmutador de dos posiciones, haciendo posible el funcionamiento combinado de marcha automática o de ciclo a ciclo.

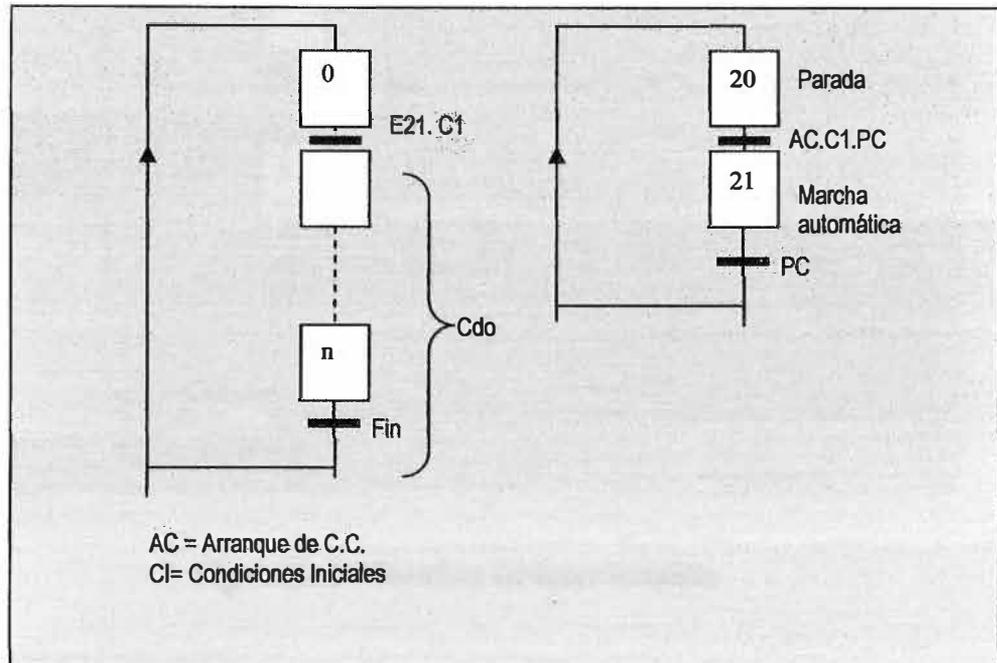


Fig A.III.4 Marcha ciclo automático

Marchas de ajuste del sistema

En este modo de funcionamiento se ejerce un control estricto no ya sobre la ejecución de un ciclo, sino sobre la ejecución de una etapa o conjunto de ellas en un mismo ciclo. Resulta ser la forma de operación utilizada, sobre todo en los procesos de ajuste y puesta a punto de los sistemas automatizados, mediante el cual se corrigen funcionamientos imprevistos, fallos, averías o correcciones precisas en el funcionamiento de máquinas o dispositivos de control.

En este modo de funcionamiento se requiere frecuentemente la parada del sistema, bien sea por inhibición de las acciones asociadas a las etapas, o bien por congelación del automatismo impidiendo el franqueamiento de determinadas transiciones. Este modo de funcionamiento requiere un profundo conocimiento del sistema, por parte del operador, así como la implementación del sistema mediante una tecnología que haga posible una fácil intervención.

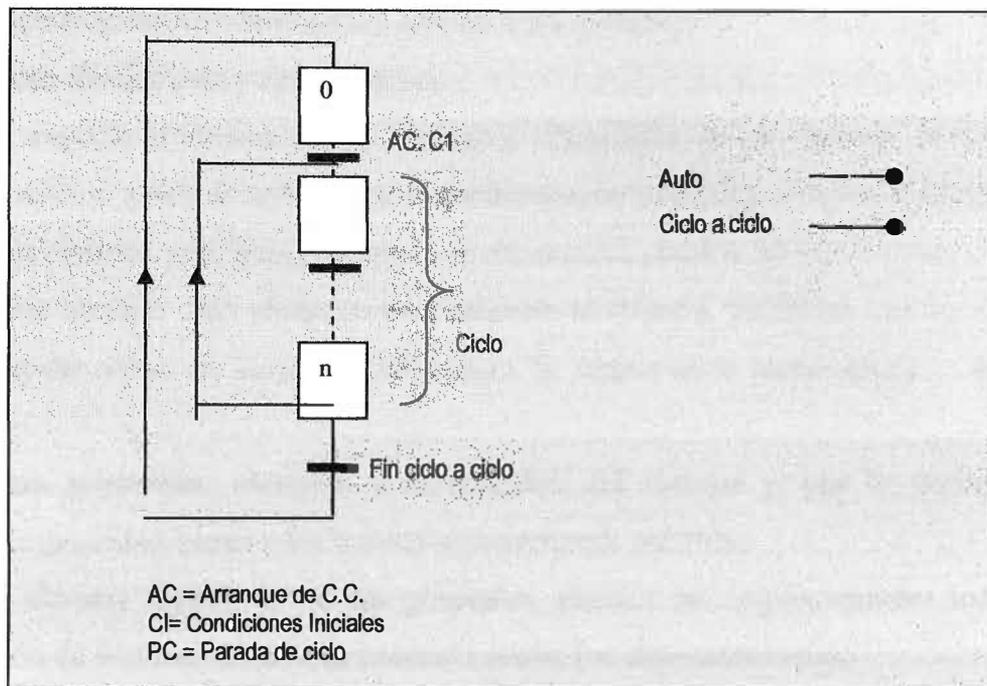


Fig A.III.5 Marchas de intervención

La Seguridad

Los dispositivos de control han de contar con los recursos necesarios dedicados al objetivo de garantizar un buen comportamiento del sistema en el caso de situaciones imprevistas, averías, emergencias, etc. Con todo ello deben asegurar, sobre todo, niveles adecuados de seguridad para los operadores humanos al cargo de los sistemas, cuando no de las propias instalaciones industriales, cuya reparación puede suponer la dedicación de grandes recursos económicos.

Bajo el concepto genérico de la seguridad se engloba la capacidad del sistema automatizado a minimizar la probabilidad de aparición de fallos en su funcionamiento, así como sus efectos. Enunciados más precisos, derivadas del concepto global, definen:

- Seguridad: ausencia de peligro para las personas e instalaciones.
- Disponibilidad: ausencia de paradas como consecuencia de fallos del sistema.

El estudio de la seguridad debe ser abordado teniendo en cuenta un doble aspecto. Por una parte el análisis de riesgos; es decir, probabilidad y gravedad en la aparición, así como el cumplimiento de la normativa legal al respecto.

No obstante, el tipo de soluciones adoptadas para asegurar al máximo la seguridad y disponibilidad de los sistemas automatizados van a estar condicionados por su naturaleza tecnológica. A este respecto en los sucesivos apartados citaremos algunas de las soluciones

que se adoptan de forma combinada y con carácter general.

Tratamiento de alarmas y emergencias

En lo que respecta al tratamiento de alarmas y situaciones de emergencia, es conveniente su clasificación a partir de criterios de implementación tecnológica de los sistemas a tratar. Por ello, las alarmas, atendiendo al grado de afectación, pueden ser clasificadas como:

➤ **Alarmas locales:** sólo afectarán parcialmente al sistema, de forma que su efecto sólo debe repercutir sobre un conjunto delimitado de dispositivos tecnológicos o subsistema concreto

➤ **Alarmas generales:** afectarán a la totalidad del sistema y, por lo general, van a disponer de prioridad frente a las locales anteriormente referidas.

Tanto las alarmas locales como las generales, pueden ser implementadas mediante la introducción de una nueva variable asociada según los siguientes casos:

➤ Introducción de la variable asociada en las condiciones de desactivación de la función lógica activadora l desactivadora de etapa.

➤ Introducción de la variable asociada en las funciones lógicas asociadas a las receptividades.

➤ Introducción de la variable asociada como condición adicional a la ejecución de las acciones asociadas a las etapas.

Los dispositivos de control han de contar con los recursos necesarios dedicados al objetivo de garantizar un

Realicemos un estudio con más detalle de lo expuesto anteriormente.

Veamos seguidamente un ejemplo del primer caso:

$$En = Zp.Zt.(En - 1.Tn - 1 + En.En + 1) \dots\dots(A.III.1)$$

En esta ecuación de activación y desactivación de etapa se han introducido dos nuevas variables: Zp que representa a una alarma de carácter local y Zt a una alarma de carácter total. Obviamente la variable representativa de la alarma de carácter total tendrá presencia en la totalidad de las ecuaciones de activación de etapas del diagrama funcional. No así la variable representativa de la alarma local, cuya aparición se restringe a un conjunto determinado de ecuaciones de activación.

Otro criterio utilizado para el tratamiento de las alarmas consiste en la intervención de las variables representativas de alarmas en las receptividades asociadas a cada transición. Ello permite, de forma relativamente fácil, hacer evolucionar el sistema a determinadas

situaciones de parada o espera ante situaciones de emergencia. De forma rigurosa las variables de alarma deberían aparecer en cada una de las etapas del Grafcet, y tener prevista cada una de las situaciones de seguridad en función del tramo en ejecución y de los niveles de seguridad solicitados.

Una posible clasificación del tratamiento de alarmas de los sistemas, frente a situaciones de emergencia, se podría realizar si el sistema se comporta utilizando los siguientes criterios:

- Sin secuencia de emergencia.
- Con secuencia de emergencia.

En el primero de ellos el sistema, ante una situación de alarma limita a detener su evolución y suspende las operaciones básicas, asociadas a la etapa donde se produce la suspensión. Además, pueden establecerse a partir de este criterio diversas variantes. Dos de ellas serían:

- Inhibición de acciones.
- Congelación del automatismo.

En la modalidad de inhibición de acciones, la aparición de la alarma no detiene directamente la evolución del automatismo, lo que inhibe a las propias acciones asociadas a las etapas.

En la modalidad de congelación del automatismo, la señal de alarma participa en cada una de las receptividades asociadas a las transiciones de forma que su activación impide la puesta a "1" de la receptividad y también la evolución del sistema. Cuando la señal de alarma desaparece el sistema puede continuar su evolución a partir de la etapa donde se produjo la alarma.

En la segunda opción de secuencia de emergencia, la evolución del sistema deriva hacia una secuencia de emergencia, constituida por una o más etapas, cuyas acciones están orientadas a situar a los operadores y al proceso mismo en las mejores condiciones posibles, en orden a salvaguardar su integridad. Esta secuencia de emergencia deberá ejecutarse ante la activación de la señal de alarma asociada, cuya naturaleza estará lógicamente condicionada por aspectos de implementación tecnológica, se ofrece un ejemplo de representación, en diagramas Grafcet, de esta opción de tratamiento mediante la aplicación de una secuencia de emergencia.

Veamos la aplicación de algunos de los conceptos vistos anteriormente, al diseño de un proceso en particular.

Ejemplo de aplicación

Se pretende realizar el volcado de una mezcla de cemento en la zona rectangular G. Para ello se dispone de un sistema de dos vagonetas que cargarán los materiales necesarios (cemento y agua), almacenados en las tolvas C y A, cuyos accionadores TC y TA provocan el vertido de los materiales respectivos; y fc y fa son dosificadores que advierten de que ya se dispone de la cantidad suficiente de material.

El ciclo puede comenzar mediante el accionamiento de un pulsador de arranque M, siempre y cuando se hallen las vagonetas dispuestas en los puntos A y D.

La vagoneta que cubre el trayecto AC dispone de motor con sentidos de marcha a derecha MD1 e izquierda M11; Y deberá detenerse previamente bajo la tolva de cemento para realizar la carga. Después debe dirigirse al punto C donde, mediante el accionamiento de VC, volcará el cemento a la vagoneta del circuito inferior. El volcado debe producirse siempre y cuando se halle la otra vagoneta debajo y éste finalizará cuando se active el sensor de fvc.

La vagoneta de la parte inferior sólo tiene sentido de marcha a derecha MD2, si bien posee un inversor de marcha que se activa al final de cada ciclo. Esta debe comenzar su recorrido cuando la otra vagoneta se sitúe debajo de la tolva de cemento, se detendrá a cargar agua en el punto E, para posteriormente dirigirse al punto F donde recibirá la descarga de cemento de la vagoneta superior. Cuando finalice la descarga la vagoneta superior debe regresar a su punto de partida A, y la inferior debe activar su molinete (accionador MOI) al tiempo que se dirige al punto G de descarga (accionador DES); cuando finalice ésta debe dirigirse al punto D cerrando el recorrido del circuito.

No obstante, supongamos que, en una segunda fase de diseño, deseamos dotar al mismo de un determinado comportamiento en los siguientes supuestos:

- a) Avería en los mecanismos de apertura/cierre de las tolvas TC y TA, en tal caso se procederá a la suspensión de todas las operaciones con retirada de las vagonetas a su lugar de origen y proceder a su reparación.
- b) Avería de cualquiera de las dos vagonetas, con lo cual debe igualmente suspenderse toda la operación y retirarlas a su lugar de origen.
- c) Aparición de algún obstáculo en la trayectoria de cualquiera de las dos vagonetas, lo cual deberá suspender temporalmente su evolución hasta que sea retirado el obstáculo.

En los casos a y b debemos dotar al diagrama funcional del sistema de una secuencia de emergencia que sitúe al mismo en situación deseada. La secuencia contempla la activación

de una alarma sonora AS cuando se produzca la avería en una u otra vagoneta; la retirada de ésta de forma manual a su punto de partida para su reparación, y finalmente la restauración de todas las condiciones iniciales que hagan posible el rearme del sistema y el retorno al buen funcionamiento.

El caso c puede ser solucionado mediante una estrategia de congelación e inhibición, introduciendo una variable en cada una de las receptividades afectadas y dotando de carácter condicional a las acciones de marcha de las vagonetas.

Las variables de alarma introducidas son P, cuya activación Indicará averías de las vagonetas, y PO que indicará presencia de obstáculo en las trayectorias de las mismas. Las modificaciones al diagrama original teniendo en consideración las variables y secuencia de alarma, queda reflejada

Como puede observarse en dicho diagrama, y en sentido riguroso, si se toman en consideración todos los posibles aspectos de la seguridad establecidos en las especificaciones de diseño del sistema en consideración de cada una de las etapas del diagrama funcional Grafcet, debería existir una divergencia hacia la secuencia de emergencia de carácter prioritario, asegurando que, sea cual fuere la situación en que se encontrase, estuviese garantizada la seguridad del sistema. No obstante, como resulta obvio a la vista del diagrama, la estrategia de representación exhaustiva en un único diagrama, puede complicar en la mayoría de casos la representación de algunos sistemas, y esto va en contra de los objetivos de legibilidad y claridad en los diagramas funcionales. Por ello se deben adoptar medidas con objeto de estructurar la representación de los sistemas.

Diseño estructurado de los sistemas de control automático

Realizar un diseño estructurado del sistema de control automático consiste en realizar, en la medida de lo posible, una representación separada de los diversos aspectos del modelo del sistema, tales como: el funcionamiento normal de producción, distintos modos de marcha posibles, paradas de emergencia asociadas a la seguridad, etc., mediante la utilización de diagramas funcionales parciales que, de la forma más exhaustiva posible sin perder su legibilidad, modelen cada uno de ellos el comportamiento del sistema de control teniendo en cuenta estos aspectos.

Diagramas jerarquizados y forzado de situaciones

Con objeto de establecer un diseño estructurado del sistema, es necesario separar mediante diagramas parciales el modelo global del mismo. Cada uno de estos diagramas Grafcet

parciales deberá modelar el funcionamiento del sistema teniendo en cuenta el aspecto en cada momento considerado. Puesto que todos los aspectos del funcionamiento del sistema están estrechamente interrelacionados, es preciso garantizar dicha interrelación entre todos y cada uno de los diagramas parciales, al tiempo que hay que establecer las condiciones de dependencia y relación de jerarquía entre los diagramas, en orden a la importancia de las funciones asociadas a los mismos.

El nivel de jerarquía podrá establecerse entre únicamente dos diagramas, en el caso más simple; o alguno más, en los casos que la complejidad del sistema así lo aconseje.

Un ejemplo de diagrama estructurado de un sistema genérico sería el que por simplicidad de representación, sólo se ha incluido un diagrama parcial de producción.

Orden de forzado

La relación entre diagramas parciales diferentes se lleva a cabo mediante los denominados ordenes de forzado, ejecutadas en un diagrama parcial jerárquicamente superior. Estas permiten modificar la situación de un diagrama parcial inferior; es decir, modificar el conjunto de etapas activadas en un instante determinado en función de la activación de una o más variables que intervienen en la receptividad de alguna transición del primer diagrama.

Dada la relación de jerarquía establecida en la orden de forzado, ésta se efectúa siempre con carácter prioritario. La orden de forzado se efectúa en un diagrama jerárquico superior, y su efecto se produce en uno inferior.

Reglas de forzado

Puesto que las órdenes de forzado afectan a la dinámica global del sistema, requieren de una serie de normas para que su aplicación quede exenta de ambigüedades e interpretación diversa. Estas reglas de evolución son:

➤ Regla n°1:

El forzado es una orden interna, como resultado de una evolución. Para una situación que comporta una o varias órdenes de forzado, los graficets forzados tomarán de inmediato y directamente la o las situaciones impuestas.

➤ Regla n° 2:

A toda aparición de una nueva situación, la aplicación del forzado es prioritaria con relación a toda actividad del modelo (evolución, afectado de las salidas, etc.

➤ Las reglas de evolución no se aplican más que en una situación por la cual el graficet

parcial forzado está en la situación impuesta por el grafcet forzante.

Como ampliación a la interpretación de las reglas anteriores tenemos:

- Los grafcets forzados se mantienen en la situación impuesta mientras sean válidas las órdenes de forzado.
- Si un Grafcet fuerza a otro lo recíproco será imposible.
- En todo momento del funcionamiento, un Grafcet sólo puede ser forzado por un único Grafcet.

Aplicación del diseño estructurado

Abordaremos nuevamente el ejemplo que, con carácter pedagógico ha sido utilizado anteriormente en el apartado de Ejemplo de Aplicación

En este caso concreto, el criterio que utilizaremos será descomponer, el modelo global en cuatro diagramas parciales los cuales representaran respectivamente: la seguridad, los modos de marcha y los dos funcionamiento de los subsistemas de cada una de las vagonetas.

El primer diagrama, jerárquicamente superior, deberá establecer criterios sobre seguridad realizados en las especificaciones de diseño el es el apartado reseñado anteriormente. Este se auxiliará de la orden de forzado consiguiente para tal efecto.

El segundo diagrama, se ocupará de hacer posible los modos de marcha automático ciclo a ciclo, o de intervención según establezca el operador.

Por último, dos diagramas que representarán el funcionamiento normal de los subsistemas de producción correspondientes a las vagonetas.

Resumen:

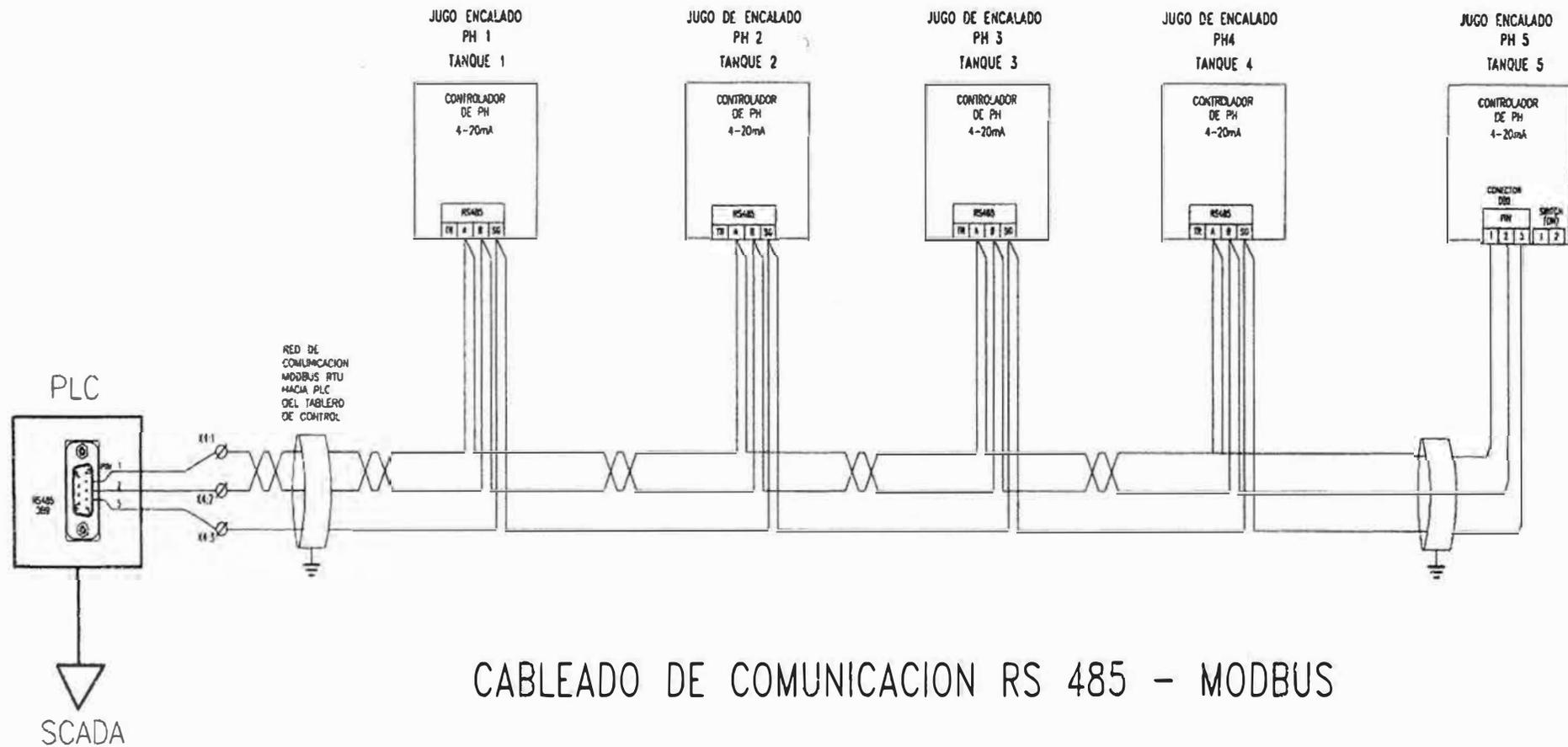
El diseño estructurado permite la incorporación, al modelo del sistema, de aspectos fundamentales de los sistemas de producción automatizados reales, tales como los modos de marcha y el tratamiento de alarmas y emergencias.

Los distintos tratamientos de alarmas y emergencias no son ni mejores ni peores, unos respecto de los otros. Estos son complementarios y adecuados para cada caso y aplicación concreta.

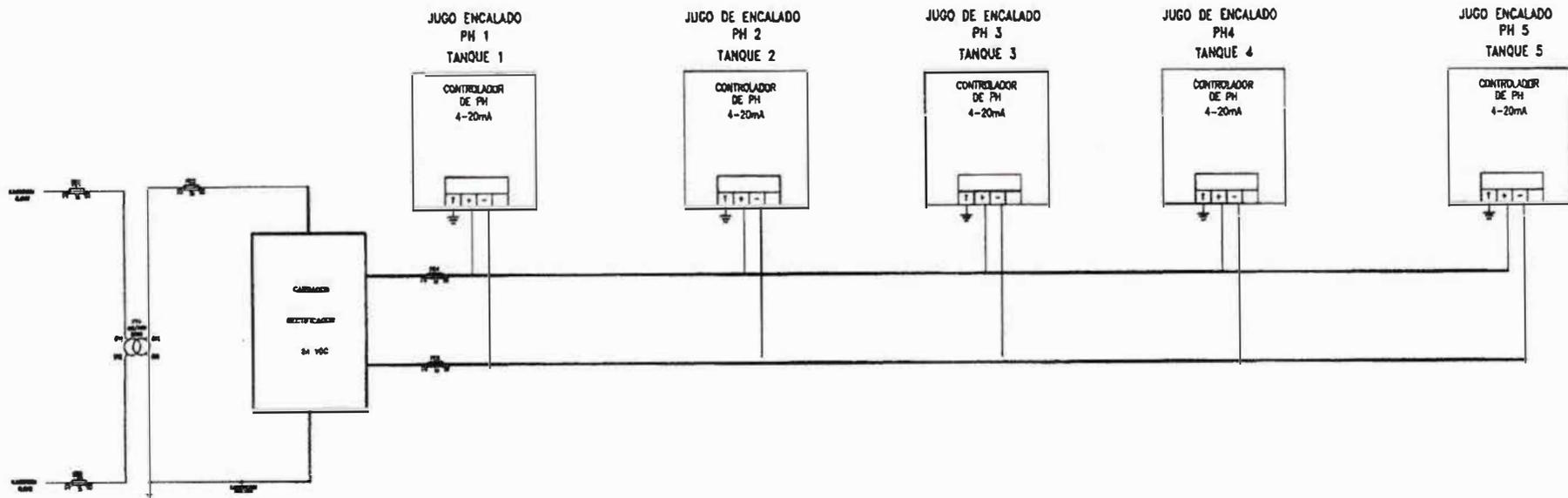
En la fase inicial de pruebas de la puesta en marcha de los sistemas automatizados en particular, y en las fases posteriores de ajuste y reglaje, es conveniente utilizar el método de comprobación etapa a etapa, con objeto de evitar los funcionamientos desastrosos

ANEXO D
ESQUEMA DE CONEXIONADO ELECTRICO Y DE
COMUNICACIONES

INTEGRACION DE LOS CONTROLADORES DE PH CON EL SISTEMA SCADA



ALIMENTACION DE LOS CONTROLADORES 24 VDC



ESQUEMA DE CONEXION ELECTRICA

BIBLIOGRAFIA

1. Medición PH
Autor: División Proceso Mettler Toledo – SUIZA
Año 2004
2. Automatización Proceso.
Autor: Proyección Social – UNI
3. Simón, A; Autómatas Programables, Editorial Paraninto, 1988.
4. Wamock, IG. Programmable Controllers (Operation and Aplication). Prentice – Hall International Editions, 1988
5. Potentiometric Analysis of a Reaction System of Organic Acids
Journal of the Mexican Chemical Society, Julio- Septiembre, Año/Vol. 47, Número 003, Sociedad Química de México, México, México.
Pp.2111-215 – Año 2003 – www.redalyc.org
6. A Pethidine Selective Polymeric Membrana Electrode
Zhi Hua. Liu , Meng Liang Wen , Yun Yao , Jie Xiong
Departament of chemiistry, Yunann University, Kunning, Yunann 650091,
PR China – March 18 - Año 2002
Bol. Soc. Chi. Quim., 47,163-168(2002).
7. Trabajo de investigación “Análisis Cuantitativo Electrométricos: pH- Metria”
Química Analítica – Universidad Nacional del Nordeste.
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura
Gabriel Esteban Cabral – Lucas Fernando Lestón Galizzi – Año 2006
8. The PID Control Algorithm
How it works, how to tune it, and how use it.
Segunda Edición
Autor: John A. Shaw – Process Control Solutions
December 1, 2003
9. Guia sobre Tecnologia de medición de pH

Instrumentos Testo - 2006

Zona Industrial c/B, nº2 08348 Cabrils (Barcelona)

www.testo.es

10. Química Analítica a Microescala Total

Alejandro Baeza, Adrián de Santiago

Facultad de Química. UNAM

Año 2006