



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
**'ARAGON'**

30  
28

**" LA COMPUTADORA DIGITAL : COMO  
HERRAMIENTA EN EL DESARROLLO DE  
SISTEMAS DE CONTROL EN PROCESOS  
INDUSTRIALES"**

**FALLA DE ORIGEN**

**T E S I S**

Que para obtener el Título de:  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICO**

**P r e s e n t a :**  
**ALFREDO GONZALEZ ORTEGA**

**Asesor : Ing. Silvia Vega Muytoy**

San Juan de Aragón, Edo. de Méx.

1995



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

---

## **DEDICATORIA A MIS PADRES.**

Han transcurrido los años desde la primera vez en que puse un pie en una escuela, la lucha y el esfuerzo que han tenido para otorgarme la mejor herencia, << el estudio >>, no ha sido en vano, y hoy gracias a ustedes que con sus consejos y llamadas de atención pudieron despertar en mí la consciencia e interés para desenvolverme de la mejor manera.

Hemos padecido altibajos, pero no han podido vencernos las adversidades, por lo que no tengo palabras para decirles una vez más gracias de todo corazón por llevarme por el buen camino y de manera humilde y antes que nada decirles que los amo y admiro.

Hoy, con este trabajo terminé una etapa de mi vida y la lucha y perseverancia continúa, por lo que he de poner todo mi empeño y dedicación para que se sigan sintiendo orgullosos como hasta ahora, es por eso que lo dedico a ustedes como prueba del esfuerzo que hemos logrado juntos.

***Fredy.***

**GLORIA ORTEGA RODRIGUEZ  
SENEN GONZALEZ RODRIGUEZ**

---

## **AGRADECIMIENTOS.**

No cabe duda que para lograr lo que uno quiera en esta vida se requiere de la ayuda de todas las personas con las que nos desempeñamos cotidianamente y en veces ocasionalmente; es por lo que en las presentes líneas reservo un pequeño espacio a aquellas que me aportaron algún consejo o ayuda para realizar el presente trabajo.

No puedo empezar sin mencionar a mi familia, a mis padres Senén y Gloria, a los cuales tengo tanto que agradecer, a mis hermanos Aidé, Edilberto y Mayra que han visto que no es fácil llegar hasta donde ahora y me dieron ánimos para terminar esta carrera. Tengo además una segunda familia, a la cual tengo un gran respeto y que gracias a su ayuda y consejos me dieron grandes lecciones, me refiero a la Sra. Teresa y Jorge, y a mi gran amigo de la infancia y desarrollo estudiantil, Carlos y hermanos, con los que he compartido momentos gratos, pero también difíciles.

En el transcurso de la carrera conocí a una persona a la que quiero mucho, y me ha dado mucho de su apoyo, tanto amoroso como comprensivo, y que a pesar de tener nuestras diferencias hoy seguimos juntos... claro se trata de mi novia "Peque" a la que le agradezco bastante el estar conmigo en situaciones adversas.

De antemano agradezco a mi asesora la Ing. Silvia Vega y a mis revisores por tomarse la molestia de apoyar el desarrollo de esta tesis, así también a los maestros de esta institución que de la mejor manera y disposición se han esforzado por darnos una preparación para saber desempeñar la ardua tarea de un ingeniero.

Un agradecimiento especial al CENIDET (Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico) en Cuernavaca, Mor. por las facilidades prestadas para la elaboración y captura de esta investigación, sin la cual francamente me hubiese costado más trabajo terminarla. En particular al Sr. Israel Zamudio por intervenir, en el permiso de trabajar en ese instituto; así como al personal que tan gentilmente me tendió su mano.

No quiero ser grosero al omitir a todas aquellas personas que de una manera u otra han participado con algún consejo para la elaboración de esta tesis, inclusive para mi persona, así entonces, he de darles las gracias por preocuparse un poco de mí.

---

# C O N T E N I D O .

## **INTRODUCCION.**

*1.- SISTEMAS DISCRETOS.*

*2.- MODELOS ORIENTADOS AL PROCESO.*

*3.- CONTROL POR COMPUTADORA.*

*4.- PLANIFICACION Y CONTROL.*

*5.- ADIU, UN SISTEMA SIMULADOR.*

*CONCLUSIONES.*

*BIBLIOGRAFIA.*

---

## I N D I C E .

INTRODUCCION	-----	IV
<b>1.- SISTEMAS DISCRETOS</b>	-----	<b>1</b>
1.1.- Introducción.	-----	2
1.2.- Sistemas en tiempo discreto.	-----	4
1.3.- Métodos de transformación.	-----	8
1.3.1.- La transformada Z.	-----	8
1.3.2.- Método del espacio de estado.	-----	10
<b>2.- MODELOS ORIENTADOS AL PROCESO</b>	-----	<b>21</b>
2.1.- Introducción.	-----	22
2.2.- Modelo de modulación.	-----	24
2.3.- Respuesta en frecuencia.	-----	34
<b>3.- CONTROL POR COMPUTADORA</b>	-----	<b>43</b>
3.1.- Introducción.	-----	44
3.2.- Tecnología de computadores.	-----	46
3.3.- Algoritmos de computador.	-----	54
3.4.- Teoría de desarrollo.	-----	58
3.5.- Sistemas controlados por computadora.	-----	62
3.5.1.- Tipos de control de procesos por computadora.	-----	64

---

<b>4.- PLANIFICACION Y CONTROL</b>	-----	<b>69</b>
4.1.- Introducción.	-----	70
4.2.- Modernización.	-----	72
4.3.- Planificación.	-----	80
4.3.1.- Instrumentos de campo.	-----	85
4.3.2.- Modernización total.	-----	87
4.4.- La función del control.	-----	89
4.5.- Desarrollo económico.	-----	96
<b>5.- ADIU, UN SISTEMA SIMULADOR</b>	-----	<b>99</b>
5.1.- Introducción.	-----	100
5.2.- El SADRE como antecedente del ADIU.	-----	102
5.3.- Principios de diseño de interfaces de usuario.	-----	106
5.3.1.- Principios de diseño de interfaces de usuario.	-----	107
5.4.- Arquitectura del ADIU.	-----	113
5.4.1.- Descripción conceptual del ADIU.	-----	113
5.4.2.- Arquitectura del ADIU.	-----	118
<b>CONCLUSIONES</b>	-----	<b>126</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	-----	<b>127</b>

---

## I N T R O D U C C I O N .

El presente trabajo ha de desarrollarse en el ámbito de la ingeniería de control, la cual está interesada en el análisis y diseño de sistemas dirigidos hacia un objetivo.

En este caso el ingeniero en sistemas de control está interesado en el conocimiento y control de una parte de su medio ambiente, frecuentemente conocido como *sistema*, a fin de proporcionar un producto económico y útil para la sociedad; tal es el caso de la computadora digital como una herramienta que da la oportunidad de controlar máquinas y procesos industriales, dando como resultado una mejor optimización de un trabajo determinado.

Un sistema de control es una interconexión de componentes, que forman una configuración del sistema, la cual proporcionará una respuesta deseada del mismo sistema.

Debido a toda esta serie de interconexión de componentes, los sistemas se hacen más complejos, originándose muchas variables que harían imposible controlarse a simple vista, por lo que es indispensable actualmente usar la computadora ya que este nuevo elemento de control nos proporciona esa capacidad para calcular con rapidez y exactitud el comportamiento de un proceso.

El control de un proceso industrial (fabricación, producción, etc.) por medios automáticos en vez de humanos se conoce frecuentemente como automatización, en el cual la computadora interviene conmutando a diferentes máquinas, para que se lleve una secuencia de el objetivo a seguir.

Así, en la industria hay controles de velocidad, presión, temperatura, posición, espesores, composición y calidad, entre muchos otros, los cuales pueden ser manejados por un computador digital.



---

El sistema de control de procesos como un ejemplo físico puede ser: el de temperatura de un horno de calentamiento en que la temperatura del horno es controlada de acuerdo por un programa preestablecido. Así de esta manera, el programa a desarrollar puede consistir en elevar la temperatura a determinado valor durante un intervalo de tiempo establecido, y luego reducir a otra temperatura prefijada también durante un período de tiempo definido. En un programa como este, el punto de ajuste varía de acuerdo con un cronograma preestablecido. Entonces el control funciona para mantener la temperatura del horno cerca del punto fijado, con una pequeña variación. Se hace notar que la mayoría de los sistemas de control de procesos incluyen servomecanismos<sup>1</sup> como parte integral.

Como vemos la aplicación futura de los sistemas y modelos de control por computadora parece ser ilimitada, la teoría y la práctica son dos extremos en donde la teoría resulta ser en ocasiones muy engorrosa; pero que ésta debe preceder a las aplicaciones en muchos campos de la ingeniería de control.

Ahora se puede tener una idea general sobre los sistemas de control y su extensa aplicación hasta en pequeñas tareas del hogar, de esta forma la presente investigación tendrá un enfoque teórico-aplicativo, pero sin llegar a demostraciones matemáticas que solo enredarían al lector, por lo que únicamente se desarrollarán los principios matemáticos en los que se basa la ingeniería de control.

---

<sup>1</sup> Un servomecanismo es un sistema de control realimentado en el cual la salida es alguna posición de velocidad o aceleración mecánica.

# CAPÍTULO

# I

<< NO HAY NINGUNA COSA BUENA QUE  
NO TENGA SU BASE EN LA RAZON. >>

SENECA ("4?-65).  
FILOSOFO HISPANOLATINO.

**SISTEMAS  
DISCRETOS**

---

## 1.1 INTRODUCCION.

En este capítulo se introducen dos conceptos importantes: los sistemas en tiempo discreto y la transformada Z, en contraste con los sistemas en tiempo continuo, cuya operación se describe o modela mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales, los cuales están constituidos por sistemas lineales invariantes en el tiempo y sistemas lineales variables en el tiempo, los cuales a su vez pueden ser lineales o no lineales, entendiendo por lineal a la representación matemática (ec. diferencial) en que sus coeficientes son constantes o funciones únicamente de la variable independiente. También los no lineales están representados por ecuaciones diferenciales no lineales. En lo que respecta a los sistemas en tiempo discreto, son aquellos cuya operación se describe mediante un conjunto de ecuaciones en diferencia. El método de transformación empleado en el análisis de sistemas en tiempo continuo invariantes en el tiempo y lineales, es el de la transformada de Laplace; de manera similar, la transformada usada en el análisis de sistemas en tiempo discreto invariantes en el tiempo y lineales es la transformada Z. El modelado de los sistemas en tiempo discreto se presentó por medio de funciones de transferencia y ecuaciones de variable de estado.

En el diseño de los sistemas reales de control, el ingeniero de control y el diseñador de componentes deben hacer frente a la infortunada verdad de que la naturaleza no ha hecho estrictamente lineales todas las relaciones físicas. Se dice, por ejemplo, que un resorte es lineal, dando a entender con ello que la curva fuerza-deflexión para el resorte es un recta. En la prueba real de un resorte puede encontrarse que la curva es ligeramente cóncava hacia arriba. La "constante" del resorte no sería tal para todas las deflexiones en este caso y el resorte no sería lineal. Esta simple ilustración del caso lineal contra el no lineal señala como concepto básico, que el comportamiento de todos los sistemas físicos en la naturaleza es inherentemente no lineal.

Referente a los sistemas de control no lineales, esta característica la adquieren precisamente a fenómenos no lineales que se presentan dependiendo si son inherentes al sistema, o si se añaden de manera establecida; estos fenómenos inherentes son en ocasiones inevitables ( Saturación, Zona Muerta, Histéresis, Juego, Elasticidad no lineal, Fricción Estática, etc.), por ejemplo el juego puede producir inestabilidad y la zona

muerta puede causar error en estado estacionario. A su vez algunos elementos no lineales son introducidos intencionalmente al sistema para mejorar su comportamiento o para simplificar la construcción del sistema, o ambos. El ejemplo más sencillo de tal sistema no lineal intencional, es un sistema convencional accionado por un relevador.

Ejemplifiquemos ahora un sistema discreto, supongase un robot industrial de alto nivel (se utilizan medios ópticos como sistema de televisión), para explorar el ambiente que rodea a un objeto. Este reconoce las imágenes y determina la presencia y orientación del objeto. Se requiere un computador para el procesamiento de señales en el reconocimiento de imágenes. En algunas aplicaciones el robot computarizado reconoce la presencia y orientación de cada parte mecánica mediante el proceso de reconocimiento de imágenes, que consiste en leer los códigos numéricos asociados con las imágenes. El robot recoge la pieza y la desplaza hacia el lugar de montaje, donde ensambla las diversas partes para formar un componente. La función del controlador la realiza un computador digital programado. (es decir muestrea o discretiza en determinados períodos del tiempo la señal para accionar al robot.)

En resumen en el presente capítulo se hace un estudio de los sistemas en los que la señal que representa el esfuerzo de control es fragmentariamente constante y varía solamente en puntos discretos del tiempo.

## 1.2 SISTEMAS EN TIEMPO DISCRETO.

Los sistemas de tiempo discreto o sistemas de datos muestreados, son sistemas dinámicos en los cuales una o más variables pueden variar solamente en ciertos instantes. Esos instantes que se han de indicar por  $kT$  o  $t_k$  ( $k= 0,1,2,\dots$ ), pueden especificar el momento en el cual se realiza alguna medición física o el tiempo en el cual se lee la memoria de una computadora digital, etc. Se toma el intervalo de tiempo entre dos instantes suficientemente pequeños, de manera que los datos de tiempo entre esos instantes, puedan ser aproximados por interpolación simple.

En la práctica, se presentan los sistemas de tiempo discreto, cuando se obtienen las mediciones necesarias para el control en forma intermitente o cuando se comparte un control de gran envergadura o computadora entre diversas plantas, de manera que se envía una señal de control a cada planta sólo periódicamente o siempre que se utiliza una computadora tal para realizar los cálculos necesarios para el control. Muchos sistemas de control industrial modernos, son sistemas de tiempo discreto porque invariablemente influyen algunos elementos cuyas entradas y/o salidas son discretas en el tiempo. Sin embargo, a veces la discretización con operación de muestreo, puede ser eternamente ficticia e introducida únicamente para simplificar el análisis de un sistema de control que en realidad sólo tiene elementos continuos.

Para tener una idea de un sistema en tiempo discreto, consideremos el sistema de control digital mostrado en la **figura 1-1a**. El computador digital desempeña la función de compensación dentro del sistema. La interconexión de la entrada del computador es un convertidor analógico-digital (A/D), y se necesita para convertir la señal de error, que es una señal en tiempo continuo, de forma que sea fácilmente procesable por el computador. A la salida del computador es necesaria la utilización de un convertidor digital-analógico (D/A), para convertir las señales digitales del computador de manera que pueda gobernar la planta.

Ahora, es necesario para gobernar la planta un <<controlador>>, el cual compara el valor real de la salida de la planta con la entrada de referencia (valor deseado), determina el error, y produce una señal de control que reducirá el error, a un valor muy pequeño. La forma como el controlador produce la señal, se denomina *acción de control*.

Describiremos de manera analítica el comportamiento del sistema y su solución más práctica a continuación: supongase que el convertidor (A/D), el computador digital y el convertidor digital (D/A) reemplacen a un compensador analógico, en tiempo continuo, proporcionalmente integral (PI)<sup>2</sup>, de manera que el sistema de control digital responda esencialmente con las mismas características que el sistema analógico. Por lo tanto la salida de un controlador analógico será mediante

$$m(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt \quad (1-1)$$

en donde  $e(t)$  es la señal de entrada al controlador,  $m(t)$  es la señal de salida del controlador y  $k_p$  y  $k_i$  son ganancias constantes determinadas mediante el proceso de diseño.

Puesto que un computador digital puede programarse para multiplicar, sumar e integrar numéricamente, la ecuación del controlador puede realizarse utilizando el computador digital. Por lo que de la **figura 1-1b** se puede utilizar una integración numérica (regla rectangular de integración numérica) siendo  $x(t)$  la integral numérica de  $e(t)$ , podemos escribir

$$x(kT) = x[(k-1)T] + Te(kT) \quad (1-2)$$

en donde  $T$  es el intervalo del algoritmo numérico, en segundos. Entonces (1-1) se convierte para el compensador digital

$$m(kT) = k_p e(kT) + k_i x(kT)$$

A la ecuación (1-2) se le llama *ecuación en diferencia lineal de primer orden*. La forma general de una ec. en diferencia invariante en el tiempo, lineal y de primer orden, es:

$$x(k) = \alpha_1 e(k) + \alpha_0 e(k-1) - \beta_0 x(k-1) \quad (1-3)$$

<sup>2</sup> Charles L. Philips, *Sistemas de control digital*, Cap. 8, pag.354

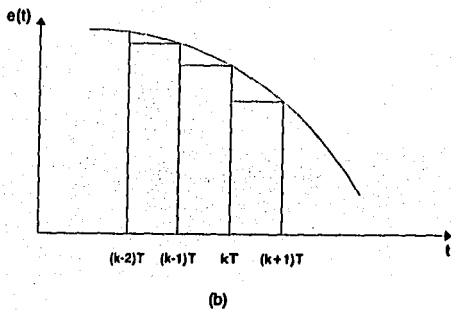
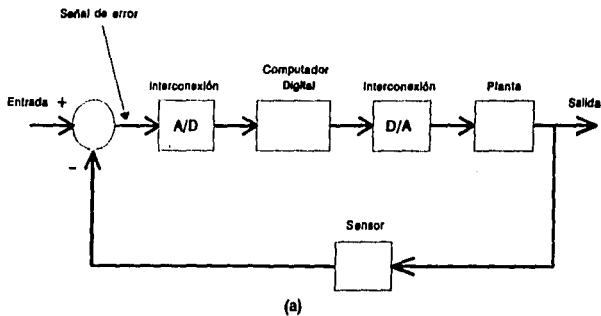


FIGURA (1-1). SISTEMA DE CONTROL DIGITAL.

Esta ecuación es de primer orden puesto que únicamente las señales procedentes del último muestreo están presentes en la misma. La forma general de una ecuación en diferencia, lineal, de orden  $n$  es

$$x(k) = \alpha_n e(k) + \alpha_{n-1} e(k-1) + \dots + \alpha_0 e(k-n) - \beta_{n-1} x(k-1) - \dots - \beta_0 x(k-n) \quad (1-4)$$

Ahora una ecuación diferencial lineal que describe un sistema en tiempo continuo de orden  $n$

$$y(t) = a_0 e(t) + a_1 \frac{de(t)}{dt} + \dots + a_n \frac{d^n e(t)}{dt^n} - b_1 \frac{dy(t)}{dt} - \dots - b_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} \quad (1-5)$$

En la cual haciendo analogías con la ecuación (1-4), podemos observar que una ecuación descriptiva de un filtro analógico invariante en el tiempo y lineal es también de la forma de (1-5). El dispositivo que realiza este filtro es usualmente una red R-L-C, tal vez con amplificadores operacionales, puede considerarse como un computador analógico programado para resolver (1-5). De la misma forma (1-4) es la ecuación descriptiva de un filtro discreto invariante en el tiempo y lineal, que se llama usualmente filtro digital. El dispositivo que realiza este filtro es un computador digital programado para resolver (1-4). Así pues, el computador digital de la **figura 1-1** podría programarse para resolver una ecuación en diferencia de la forma de (1-4), y el problema del diseñador de sistemas de control sería determinar:

- (1)  $T$ , el período de muestreo.
- (2)  $n$ , el orden de la ecuación en diferencia.
- (3)  $\alpha_i$  y  $\beta_i$ , los coeficientes del filtro.

de tal manera que el sistema tenga las características deseadas. Existen problemas adicionales en la realización del filtro digital: por ejemplo la longitud de palabra del computador necesaria para mantener los errores del sistema a niveles aceptables debidos al redondeo del mismo.



### 1.3 METODOS DE TRANSFORMACION.

Para realizar un estudio de los sistemas en tiempo discreto, podemos recurrir fácilmente a un análisis por medio del *Método de la transformada Z* o el *método del espacio de estado*.

Así como en un sistema en tiempo continuo, invariante en el tiempo y lineal, la transformada de Laplace puede utilizarse para el análisis y diseño, también la transformada Z tiene la misma relación respecto a sistemas lineales invariantes en el tiempo en tiempo discreto.

Se abordarán los respectivos métodos de la manera más sencilla, y con un desarrollo matemático en lo posible compactado con el objetivo de no entrar en tantos detalles que llegan a complicarse demasiado.

#### 1.3.1 LA TRANSFORMADA Z.

Para el método de la transformada Z sólo se toma una alternativa, en la que a partir de la transformada de Laplace del sistema de ecuaciones diferenciales denotado por (1-5) y solucionando para la función de transferencia:

$$\frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0}{b_n s^n + \dots + b_1 s + 1} \quad (1-6)$$

De la misma forma, se puede definir ahora una transformada que pueda utilizarse en el análisis de sistemas en tiempo discreto modelados por ecuaciones en diferencia de la forma dada en (1-4).

Una transformada se define por una secuencia de números de la forma siguiente:

La función  $E(z)$  se define como una serie de potencias en  $z^k$  con coeficientes iguales a los valores de una secuencia de números  $\{e(k)\}$ . Esta transformada, llamada transformada Z, se expresa entonces como:

$$E(z) = \mathfrak{Z}\{e(k)\} = e(0) + e(1)z^{-1} + e(2)z^{-2} + \dots \quad (1-7)$$

en donde  $\mathfrak{Z}(\bullet)$  indica la operación de transformada Z. La ecuación (1-7) puede escribirse en notación compacta como:

$$E(z) = \mathfrak{Z}\{e(k)\} = \sum_{k=0}^{\infty} e(k) z^{-k} \quad (1-8)$$

La transformada Z se define mediante cualquier secuencia de números  $\{e(k)\}$ , y puede utilizarse en el análisis de cualquier sistema descrito mediante ecuaciones en diferencia. Si la secuencia  $e(k)$  se genera a partir de la función temporal  $e(t)$  mediante muestreos cada T segundos,  $e(k)$  se entiende como  $e(kT)$ , pero (T se omite por conveniencia).

Bien, se ha visto que la solución de ecuaciones en diferencia por el método de la transformada Z es muy útil, como lo es la solución de ecuaciones diferenciales por la transformada de Laplace.

### 1.3.2 METODO DEL ESPACIO DE ESTADO.

El procedimiento por el cual se hace actualmente un análisis de sistemas en tiempo discreto utiliza lo que se conoce como método de la *variable de estado* o en el espacio de estado<sup>3</sup>.

A partir del descubrimiento de este nuevo método para el análisis y proyecto de sistemas de control, vendría a revolucionar lo que hoy se conoce como la TEORIA DE CONTROL MODERNA; Esta tendencia moderna en la ingeniería de sistemas se inclina hacia una complejidad mayor, en donde se requiere hacer tareas con más exactitud. Estos sistemas complejos pueden tener múltiples entradas y múltiples salidas y pueden ser variables en el tiempo. Este nuevo método se basa en el concepto de estado, el cual es un sistema dinámico, con el conjunto más pequeño de variables (denominadas variables de estado) tales que el conocimiento de esas variables en  $t=t_0$ , conjuntamente con la entrada para  $t \geq t_0$ , determinan totalmente el comportamiento del sistema para cualquier tiempo  $t \geq t_0$ .

Entonces, el estado de un sistema dinámico en el tiempo  $t$  queda determinado de igual manera por el estado en el tiempo  $t_0$  y la entrada para  $t \geq t_0$ , y es independiente del estado y la entrada antes de  $t_0$ .

Entrando de lleno a como se desarrolla el método, hemos dicho anteriormente que un sistema en tiempo discreto se podía describir mediante una ecuación en diferencia. Si el sistema en tiempo discreto es lineal e invariante en el tiempo, podemos también representar el sistema por medio de una función de transferencia; en el que tenemos como entrada  $E(z)$  y salida  $M(z)$ , por lo que podemos escribir.

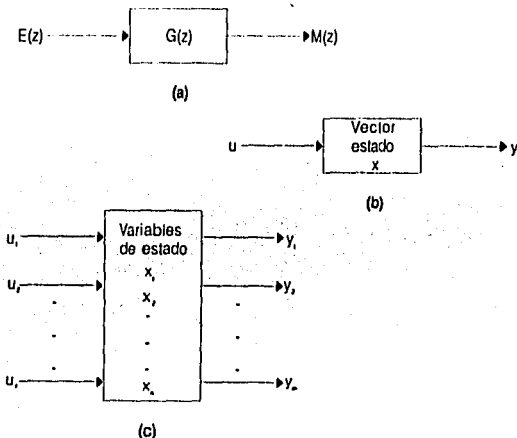
$$m(z) = G(z)E(z) \quad (1-9)$$

Así pues, el sistema en tiempo discreto puede representarse por medio de un diagrama a bloques, como se muestra en la **figura 1-2a**.

---

<sup>3</sup> Vid. Katsuhito Ogata, Ingeniería de control moderna, cap. 14, págs. 754-762.

Ahora bien, si desarrollamos nuestro problema por el método de variable de estado, tendríamos que modelarlo como se muestra en la **figura 1-2b**. De esta manera podemos generalizar, y permitimos la posibilidad de más de una entrada, y más de una salida. Así pues, en la **figura 1-2b**, las variables  $u_i$ ,  $i=1, \dots, r$ , son las entradas externas que gobiernan el sistema; las variables  $y_i$ ,  $i=1, \dots, m$ , representan las salidas del sistema o la respuesta del mismo; y las variables  $x_i$ ,  $i=1, \dots, n$  son las variables internas o de estado del sistema. Las variables de estado describen totalmente la dinámica del sistema. En otras palabras, representan la mínima cuantía de información que es necesaria para determinar los estados futuros y las salidas del sistema para unas funciones de entrada dadas; Esto es, dados los estados del sistema, la dinámica del mismo y las funciones de entrada podemos determinar todos los estados subsiguientes y salidas.



**FIGURA (1-2). REPRESENTACIONES DE DINAMICAS DE SISTEMAS:**  
 (a) REPRESENTACION DE LA TRANSFORMADA  $z$  DE LA FUNCION;  
 (b) REPRESENTACION DE VARIABLE DE ESTADO;  
 (c) REPRESENTACION DEL VECTOR ESTADO.

Por conveniencia representamos el sistema mostrado en la **figura 1-2b** mediante el de la **figura 1-2c**, en donde  $\mathbf{u}$  es un vector de entrada,

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n \end{bmatrix}$$

$\mathbf{y}$  es un vector salida,

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_m \end{bmatrix}$$

Y  $\mathbf{x}$  es un vector estado conteniendo a las variables de estado,

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix}$$

El conjunto de valores que el vector entrada  $\mathbf{u}$  puede asumir como una función de tiempo discreto  $k$ , escrita  $u(k)$ ; se llama el espacio de entrada del sistema. El espacio salida y el espacio estado se definen de manera similar.

En general, la ecuación que describe el estado del sistema en cualquier instante  $k+1$  se da mediante la relación funcional

$$x(k+1) = f\{x(k), u(k)\} \quad (1-10)$$

Esta ecuación expone simplemente que el estado  $x$  en el instante  $k+1$  es una función del estado  $y$  de la entrada en el intervalo precedente  $k$ . La respuesta del sistema se define de una manera similar como:

$$y(k) = g\{x(k), u(k)\} \quad (1-11)$$

Si el sistema es lineal, entonces las ecuaciones (1-10) y (1-11) se reducen a:

$$x(k+1) = A(k)x(k) + B(k)u(k) \quad (1-12)$$

$$y(k) = C(k)x(k) + D(k)u(k) \quad (1-13)$$

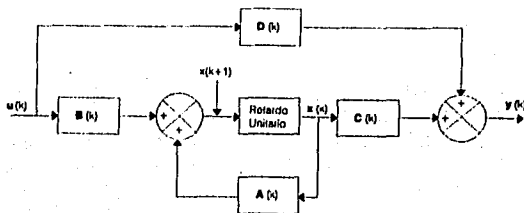
en donde  $x$  es un  $n$ -vector (vector de estado),  $u$  es un  $r$ -vector (vector de entrada),  $y$  es un  $m$ -vector (vector de salida), como se muestra en la **figura 1-2**, [No olvidemos que utilizamos una notación simplificada  $x(k)$  para indicar  $x(kT)$ . Es decir  $x(k)$  implica el vector  $x(t)$  en  $t=kT$ . De manera similar se utiliza una simplificación para  $u(k)$ ,  $y(k)$ ,  $A(k)$ ,  $B(k)$ ,  $C(k)$  y  $D(k)$ .] y a su vez  $A(k)$ ,  $B(k)$ ,  $C(k)$  y  $D(k)$  son matrices variables en el tiempo de dimensiones  $n \times n$ ,  $n \times r$ ,  $m \times n$  y  $m \times r$ , respectivamente.

Si el sistema lineal discreto en el tiempo es invariante en el tiempo, entonces las matrices en (1-12) y (1-13) son constantes, y por consiguiente las ecuaciones se reducen a:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (1-14)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (1-15)$$

Las ecuaciones (1-14) y (1-15) son ecuaciones de estado para un sistema lineal invariante en el tiempo y representan usualmente el punto de partida del análisis o síntesis de un sistema discreto; que como podemos observar en la **figura 1-3** tenemos un diagrama a bloques del sistema de tiempo discreto, descrito por las ecuaciones (1-12) y (1-13). Sin embargo, examinemos primeramente la relación entre este procedimiento y el método de la transformada Z. Por lo que mostraremos cómo se genera un conjunto de ecuaciones de variables de estado discretas a partir de la función de transferencia transformada Z.



**FIGURA (1-3). DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE TIEMPO DESCRIPTO EN LAS ECUACIONES (1-12) Y (1-13).**

Dada la función de transferencia

$$G(z) = \frac{a_{n-1}z^{n-1} + a_{n-2}z^{n-2} + \dots + a_1z + a_0}{z^n + b_{n-1}z^{n-1} + \dots + b_1z + b_0} \quad (1-16)$$

podemos escribir esta expresión de la forma siguiente:

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = G(z) = \frac{a_{n-1}z^{n-1} + a_{n-2}z^{n-2} + \dots + a_1z + a_0}{z^n + b_{n-1}z^{n-1} + \dots + b_1z + b_0} \frac{E(z)}{E(z)} \quad (1-17)$$

sea ahora

$$Y(z) = (a_{n-1}z^{n-1} + a_{n-2}z^{n-2} + \dots + a_1z + a_0) E(z) \quad (1-18)$$

$$U(z) = (z^n + b_{n-1}z^{n-1} + \dots + b_1z + b_0) E(z) \quad (1-19)$$

recordemos que la correspondencia

$$\begin{aligned} E(z) &\rightarrow \theta(k) \\ zE(z) &\rightarrow \theta(k+1) \\ z^2E(z) &\rightarrow \theta(k+2) \end{aligned}$$

bajo esta correspondencia definimos las variables de estado

$$\begin{aligned} x_1(k) &= \theta(k) \\ x_2(k) &= x_1(k+1) = \theta(k+1) \\ x_3(k) &= x_2(k+1) = \theta(k+2) \\ &\vdots \\ x_n(k) &= x_{n-1}(k+1) = \theta(k+n-1) \end{aligned} \quad (1-20)$$



A partir de las ecuaciones (1-19) y (1-20) obtenemos las ecuaciones de estado

$$x_1(k+1) = x_2(k)$$

$$x_2(k+1) = x_3(k)$$

$$x_3(k+1) = x_4(k)$$

$$\vdots$$

$$x_n(k+1) = -b_0 x_1(k) - b_1 x_2(k) - b_2 x_3(k) \dots - b_{n-1} x_n(k) + u(k)$$

que escritas en forma matricial son:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ \vdots \\ x_n(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -b_0 & -b_1 & -b_2 & -b_3 & -b_4 & \dots & -b_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_n(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (1-21)$$

o simplemente

$$x(k+1) = Ax(k) + bu(k) \quad (1-22)$$

Nótese que para sistemas de una entrada, las matrices **B** y **D** de (1-14) y (1-15) quedan reducidas a vectores **b** y **d**. La ecuación de salida obtenida a partir de (1-18) es:

$$y(k) = [a_0 a_1 \dots a_{n-1}] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_n(k) \end{bmatrix} \quad (1-23)$$

o simplemente

$$y(k) = \mathbf{C}x(k) \quad (1-24)$$

Nótese que para sistemas de única salida, la matriz **C** de (1-15) se reduce a un vector **c**, y para sistemas de una entrada, una salida la matriz **D** se reduce a un único parámetro **d**. (La notación para un vector [ya sea fila o columna] es una letra en minúscula en negrita). Por lo tanto concluimos que las ecuaciones (1-22) y (1-24) son un conjunto de ecuaciones de estado para el sistema discreto descrito por la ecuación (1-16).

Otra representación conveniente y que usualmente también se utiliza para el estudio de los sistemas discretos es el grafo (reograma) o su equivalente el esquema funcional (diagrama a bloques). Estas dos formas de representación se pueden obtener a partir de la ecuación (1-16) dividiendo primeramente el numerador y denominador por  $z^n$ , lo que conduce a:

$$G(z) = \frac{a_{n-1}z^{-1} + a_{n-2}z^{-2} + \dots + a_1z^{1-n} + a_0z^{-n}}{1 + b_{n-1}z^{-1} + \dots + b_1z^{1-n} + b_0z^{-n}} \quad (1-25)$$

Una vez más podemos expresar esta función de transferencia en la forma:

$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{a_{n-1}z^{-1} + a_{n-2}z^{-2} + \dots + a_1z^{1-n} + a_0z^{-n}}{1 + b_{n-1}z^{-1} + \dots + b_1z^{1-n} + b_0z^{-n}} \frac{E(z)}{E(z)} \quad (1-26)$$

A partir de esta expresión obtenemos las dos ecuaciones

$$Y(z) = (a_{n-1}z^{-1} + a_{n-2}z^{-2} + \dots + a_1z^{1-n} + a_0z^{-n}) E(z) \quad (1-27)$$

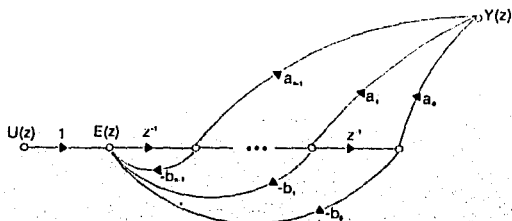
$$U(z) = (1 + b_{n-1}z^{-1} + \dots + b_1z^{1-n} + b_0z^{-n}) E(z) \quad (1-28)$$

La ecuación (1-28) puede volverse a escribir en la forma:

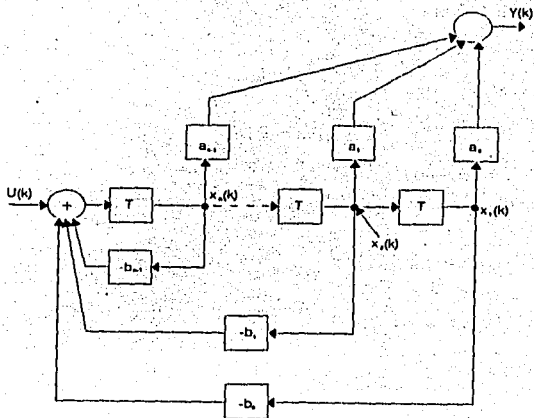
$$E(z) = U(z) - b_{n-1}z^{-1}E(z) - \dots - b_1z^{1-n}E(z) - b_0z^{-n}E(z) \quad (1-29)$$

Una representación en forma de grafo del sistema descrito por la ecuación (1-16) puede obtenerse fácilmente a partir de las ecuaciones (1-27) y (1-29) que se observa en la **figura 1-4a**.

Recuérdese que la función de transferencia para un retardo puro de T segundos es  $z^{-1}$ , en donde T es el incremento de tiempo discreto (es decir, T es el intervalo entre dos instantes de muestreo k, k+1, k+2, etc.). Utilizando esta relación, el grafo de señal de la **figura 1-4a** puede convertirse inmediatamente en su equivalente esquema funcional de la **figura 1-4b**. Se ve a partir de (1-21) y (1-23) que los estados son las salidas registro, como se observa en la **figura 1-4b**.



(a)



(b)

**FIGURA (1-4). REPRESENTACIONES EQUIVALENTES DE LA ECUACION (1-16): (a) GRAFO REPRESENTATIVO DE LA ECUACION (1-16); (b) ESQUEMA FUNCIONAL EQUIVALENTE DEL GRAFO MOSTRADO EN (a).**

Tal vez el desarrollo planteado sea un problema para entender los sistemas en tiempo discreto, y es que esto se debe a que muchos de los sistemas de hoy en día suelen tener varias entradas y también múltiples salidas, las cuales pueden estar interrelacionadas en forma complicada. Para analizar dichos sistemas, es vital reducir la complejidad de las expresiones matemáticas, así como recurrir a la computadora para analizar los cálculos más tediosos; en donde nos podemos auxiliar del método del espacio de estado para un análisis más adecuado.

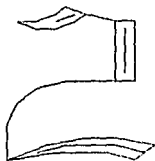
Ahora hemos visto que desde el punto de vista computacional, los métodos de espacio de estado son particularmente adecuados para los cálculos en computadora digital, debido a su enfoque en el dominio del tiempo. Esto ayuda mucho al ingeniero, al que se le disminuye trabajo en cálculos y sólo se enfoca únicamente a aspectos analíticos del problema.

Finalmente para hacer incapié en el método de espacio de estado, no necesariamente las variables de estado deben ser magnitudes físicas del sistema. Se pueden elegir como variables de estado aquellas magnitudes que no representan magnitudes físicas o que no son medibles ni observables. Esta libertad en la elección de variables de estado, es otra ventaja de los métodos de espacio de estado<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> Vid. Charles L. Phillips, *Sistemas de control digital (Análisis y diseño)*, cap. 2, págs. 65-63.

# CAPITULO



<< EL CORAZON TIENE RAZONES  
QUE LA RAZON NO CONOCE. >>

BLAISE PASCAL (1623-1662).  
MATEMATICO, FISICO  
Y FILOSOFO Frances.

**MODELOS  
ORIENTADOS  
AL PROCESO.**

---

## 2.1 INTRODUCCION.

En el capítulo 1 se desarrollaron los modelos matemáticos para un sistema muestreado *desde el punto de vista del computador*. Las variables que representan la señal medida y la señal de control son consideradas únicamente para el instante de muestreo. Estas variables cambian en unos instantes de tiempo indicados por un reloj de sincronización del sistema. Las señales son representadas naturalmente por el computador como una secuencia de números. Por lo tanto, el modo en que operan los sistemas muestreados pueden variar con el tiempo, pero se ignora, ya que el reloj del sistema ha sido sincronizado para tomar las señales únicamente en instantes de tiempo. De esta manera podemos llamarlos como *sistemas invariantes y discretos en el tiempo*. El modelo obtenido es denominado modelo estroboscópico.

El modelo estroboscópico nos da una completa descripción del sistema mientras sea observado desde el computador, pero en algunas ocasiones esto no es suficiente. Por tanto es válido disponer de otros modelos que den descripción más detallada. Estos modelos son necesarios cuando el sistema controlado por computador se observa desde el proceso, en donde la perspectiva del problema es diferente y los análisis cambian necesariamente, haciéndose estos más complicados ya que ahora debe tratarse explícitamente la naturaleza periódica del sistema.

Sin embargo, cuando el sistema se analiza desde el punto de vista del proceso, tal como se hace en este capítulo, el sistema es variable en el tiempo. De este modo, el método algebraico pierde su simplicidad, porque la multiplicación de funciones temporales no conmuta con operadores diferenciales y operadores en diferencias.

Antes de entrar a detalles, estableceremos la importancia de como llevar acabo la descripción de los sistemas. Y es que de nuevo intervienen algunas de las propiedades comunes con los métodos de las transformadas para sistemas lineales invariantes en el tiempo.

Para tal análisis interviene un dispositivo esencial de un sistema de tiempo discreto, el cual es como una llave que se cierra para admitir una señal de entrada cada  $T$  segundos, al cual se denomina como *muestreador*. El muestreador convierte una señal continua en un tren de pulsos producidos en los instantes de muestreo,  $0, T, 2T, \dots$ , donde  $T$  es el período de muestreo.

A su vez, inversamente a como actúa el muestreador, tenemos otro dispositivo importante y que convierte la señal muestreada en una señal continua que reproduce aproximadamente la señal aplicada al muestreador, al que se le llama *dispositivo de retención* (mantenedor).

Cada convertidor (A/D) y (D/A) se asocia con una operación de muestreo. Ya que el muestreo puede definirse como una modulación en amplitud, las partes que varíen en el tiempo se asociarán con estas operaciones, de este modo, el sistema puede separarse en diferentes partes: algunas partes son sistemas lineales invariantes en el tiempo que pueden manejarse con los métodos normales de transformadas; las otras partes están formadas por muestreadores que son intrínsecamente variables en el tiempo.

Además veremos que no sólo se puede hacer un estudio por medio del modelo de modulación en el que se considera la naturaleza periódica de los sistemas muestreados, sino que, en muchos de los casos las especificaciones de un sistema de control se dan en el dominio de la frecuencia. Un ejemplo típico lo constituyen los pilotos automáticos para aviones. Este estudio es más que nada para asegurar que se cumplen las especificaciones del sistema completo, pero lo detallaremos con más exactitud en la sección 2.3.



## 2.2 MODELO DE MODULACION.

El proceso del muestreo, como se trata en la teoría del sistema de control por muestreo de datos implica la transformación de datos de una forma analógica continua a datos que contienen la forma de valores discretos. El proceso de manera generalizada podemos observarlo en la **figura 2-1**. La información continua, **figura 2-1a**, se pasa a través de un *switch* de muestreo, **figura 2-1b**, el cual cierra momentáneamente cada T segundos. La forma muestreada de los datos se indica en la **figura 2-1c** como puntos sobre la curva.

$$f(0), f(T), f(2T), \dots, f(nT), \dots$$

El tema central consiste en desarrollar el modelo de modulación. Este modelo es más complicado que el desarrollado en el capítulo anterior, es decir, el estroboscópico. La principal dificultad radica en que debe considerarse la naturaleza periódica de los sistemas muestreados. El sistema puede describirse como un modulador en amplitud seguido de un sistema lineal. La señal o función puede representarse matemáticamente como un tren modulado de pulsos; aunque una idealización adicional, es que las muestras (pulsos) sean aproximados a impulsos. El área bajo cada impulso representa el valor de la función  $f(t)$  en cada uno de los instantes de muestreo. La forma de los datos muestreados de  $f(t)$  se describe comúnmente por medio de la notación  $f^*(t)$ . Así,

$$f^*(t) = f(t) \delta^*(t)$$

donde  $\delta^*(t)$  es una portadora del impulso unitario, o tren de impulsos unitarios.

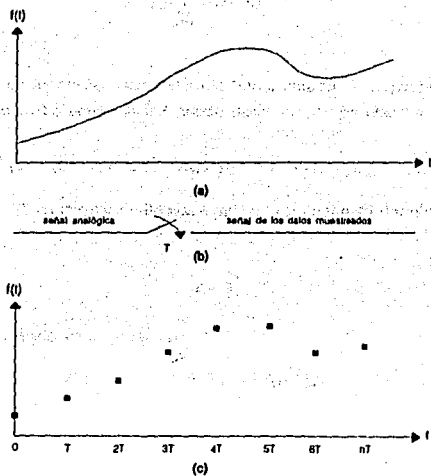
$$\delta^*(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t - nT) \quad (2-1)$$

Entonces,

$$f^*(t) = f(t) \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t - nT) \quad (2-2)$$

o bien

$$f'(t) = \sum_{n=0}^{\infty} f(nT) \delta(t-nT) \quad (2-3)$$



**FIGURA (2-1). INTERPRETACION GRAFICA DEL PROCESO DE MUESTREO: (a) FUNCION CONTINUA; (b) SWITCH DE MUESTREO; (c) FUNCION MUESTREADA.**

La ecuación 2.3 para la función con asterisco es la forma de los datos muestreados de la función continua  $f(t)$ . Generalmente es transformable por medio de Laplace, es decir,

$$\mathcal{L}\{f^*(t)\} = \mathcal{L}\left\{\sum_{n=0}^{\infty} f(nT)\delta(t-nT)\right\}$$

$$F^*(s) = \sum_{n=1}^{\infty} f(nT)e^{-nTs} \quad (2-4)$$

La función con asterisco en  $s$  denota la transformada de Laplace de la función del tiempo muestreada. La ecuación 2-4 puede desarrollarse en una secuencia

$$F^*(s) = f(0) + f(T)e^{-Ts} + f(2T)e^{-2Ts} + \dots + f(nT)e^{-nTs} + \dots \quad (2-5)$$

La ecuación 2-5 es la relación básica a partir de la cual está definida la transformada  $z$ . Es decir, sea

$$z = e^{Ts}$$

Por tanto, sustituyendo en la ecuación 2-4,

$$F^*(s) \Big|_{s = \frac{1}{T} \ln z} = F(z) = \sum_{n=0}^{\infty} f(nT)z^{-n} \quad (2-6)$$

y la transformada inversa de  $F(z)$  está dada por la ecuación 2-2, o en su forma desarrollada

$$f^*(t) = f(0)\delta(t) + f(T)\delta(t-T) + f(2T)\delta(t-2T) + \dots + f(nT)\delta(t-nT) + \dots$$

Desde el punto de vista geométrico, la variable  $z$  introducida lleva el índice  $n$  que identifica la posición relativa de un pulso con respecto al tren de pulsos.

En el caso especial de un control con computador que emplee un algoritmo con ganancia unidad y retardo de tiempo insignificante, la acción combinada del convertidor (A/D), el computador, y el convertidor (D/A) puede describirse como un sistema que muestra la señal analógica y produce otra señal analógica que es constante durante cada período de muestreo. A tal circuito se le denominó *muestreador y mantenedor*. Un convertidor (A/D) también puede describirse como un muestreador y mantenedor.

El circuito mantenedor conserva constante el voltaje analógico durante la conversión a una representación digital. En primer lugar desarrollaremos un modelo detallado para el circuito muestreador y mantenedor.

#### *Un modelo del muestreador y mantenedor.*

La **figura 2-2** muestra el esquema de un circuito analógico muestreador y mantenedor. Se supone que el circuito continúa con un amplificador de muy alta impedancia de entrada. El circuito funciona del siguiente modo: cuando se cierra el interruptor de muestreo (*switch*), el condensador se carga al voltaje de entrada a través de la resistencia R. Cuando el interruptor de muestreo se abre, el condensador mantiene su voltaje hasta el siguiente período de muestreo.

Para describir el sistema se introduce una función  $m$ , la cual describe la apertura y cierre del interruptor de muestreo. Esta función está definida por

$$m(t) = \begin{cases} 1 & \text{si el interruptor está abierto} \\ 0 & \text{si el interruptor está cerrado} \end{cases}$$

Entonces, la corriente viene dada por:

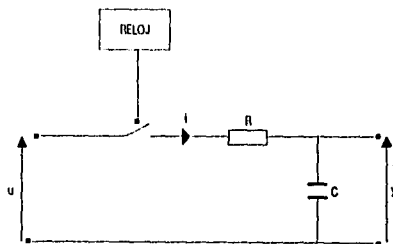
$$i = \frac{U - y}{R} m$$

De este modo, la corriente se *modula* por la función  $m$ , la cual se denomina *función de modulación*. Si la impedancia de entrada del circuito que sigue al muestreador y

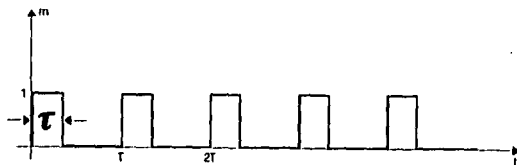
mantenedor es grande, el voltaje del condensador está definido por:

$$C \frac{dy(t)}{dt} = i(t) = \frac{u(t) - y(t)}{R} m(t) \quad (2-7)$$

La ecuación diferencial (2-7) es un sistema lineal *que varía* con el tiempo. La variación en el tiempo está causada por la modulación. Si el período de muestreo es  $T$  y el interruptor permanece cerrado  $\tau$  segundos en cada muestreo, la función  $m$  tiene la forma mostrada en la **figura 2-3**. Como  $m$  es una función periódica, el sistema resulta ser un *sistema periódico*.



**FIGURA (2-2).** DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN CIRCUITO MUESTREADOR Y MANTENEDOR DE PRIMER ORDEN.

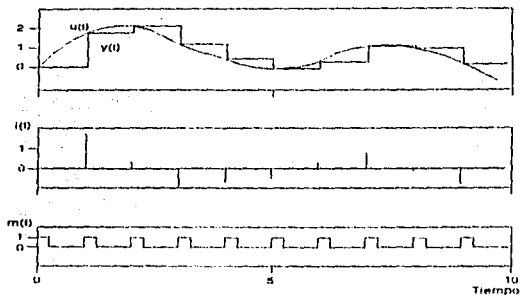


**FIGURA (2-3).** GRAFICO DE LA FUNCION DE MODULACION  $m$  CON PERIODO  $T$  Y ANCHURA DE PULSO  $\tau$ .

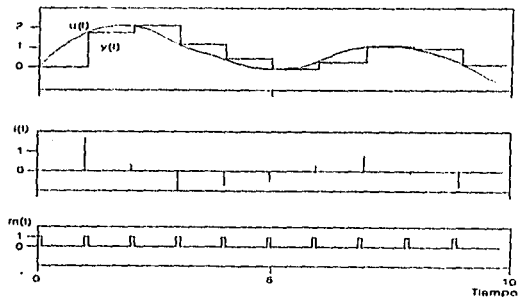
Una vez que se ha obtenido el modelo matemático del circuito, puede estudiarse su respuesta a una señal de entrada  $u$ . De la ecuación (2-7) se obtiene que el voltaje del condensador es constante cuando el interruptor está abierto, es decir, cuando  $m(t)=0$ . Cuando el interruptor se cierra, el voltaje alcanza la señal de entrada  $u$  como un sistema dinámico de **primer orden** con una constante de tiempo RC. La constante de tiempo RC del circuito debe ser considerablemente menor que la anchura del pulso; de otro modo, el condensador no dispone de tiempo para cargarse al voltaje de entrada cuando el circuito se cierra.

La **figura 2-4** muestra los resultados de una simulación del circuito muestreador y mantenedor. Con los parámetros elegidos, la anchura del pulso  $\tau$  es tal que la señal de entrada cambia significativamente cuando se cierra el interruptor.

La **figura 2-5** muestra lo que ocurre cuando la anchura del pulso es menor. El resultado de la **figura 2-5** representa una elección razonable del valor de los parámetros. El circuito muestreador y mantenedor alcanza rápidamente el valor de la señal de entrada y la mantiene constante durante el período de muestreo.



**FIGURA (2-4).** SIMULACION DE UN CIRCUITO MUESTREADOR Y MANTENEDOR. LA ANCHURA DEL PULSO  $\tau$  ES 0,2 s Y LA CONSTANTE DE TIEMPO ES  $RC=0,01$  S.



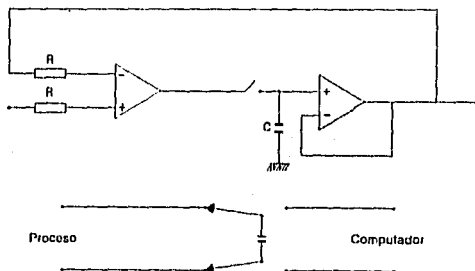
**FIGURA (2-5).** SIMULACION DE UN CIRCUITO MUESTREADOR Y MANTENEDOR. LA ANCHURA DEL PULSO  $\tau$  ES 0,05 s Y LA CONSTANTE DE TIEMPO  $RC=0,01$  S.

### Muestreadores prácticos.

En la práctica, un muestreador no se realiza como se representa en la **figura 2-2**. Una realización común se muestra en la **figura 2-6**. Para mantener la carga en el condensador se utiliza un amplificador operacional. El circuito de la **figura 2-6** también se puede describir por la ecuación (2-7).

Para evitar problemas de ruidos eléctricos y derivaciones a masa es importante aislar galvánicamente el computador de las señales del proceso. Esto puede llevarse a cabo mediante un circuito como el mostrado en la **figura 2-7**, el cual se denomina *circuito del condensador flotante*. El circuito combina el aislamiento eléctrico con la acción de muestrear y mantener de un modo sencillo. El condensador se carga al voltaje de entrada cuando éste se conecta a la línea de entrada. Cuando el condensador se conecta al convertidor (D/A) mantiene su voltaje. El aislamiento eléctrico se obtiene porque el condensador está conectado al proceso o al convertidor (D/A) del computador de control. En la práctica es muy común cargar el condensador a través de un amplificador operacional. El circuito de condensador flotante se puede describir con la ecuación (2-7).

**FIGURA (2-6). UNA REALIZACION PRACTICA DE UN CIRCUITO MUESTREADOR Y MANTENEDOR.**



**FIGURA (2-7). CIRCUITO MUESTREADOR Y MANTENEDOR BASADO EN LA REALIZACION DEL CONDENSADOR FLOTANTE.**



### Una idealización matemática.

Habíamos hablado anteriormente de que el sistema de modulación podía idealizarse, acercando los pulsos por impulsos, veamos esto más detalladamente; parece razonable diseñar el circuito muestreador y mantenedor para que la anchura del pulso  $\tau$  sea menor que el período de muestreo. También parece razonable elegir la constante de tiempo RC más corta que la anchura del pulso. Entonces, la corriente a través del condensador estará formada por pulsos cortos. Tanto la altura como la integral en el tiempo de un pulso es proporcional a la diferencia  $u-y$  entre el voltaje de entrada  $u$  y el voltaje del condensador y en los instantes de muestreo.

En la idealización, los pulsos de corriente se reemplazan por impulsos. Por simplicidad, la integral de los impulsos se elige proporcional a la señal de entrada  $u$  en los instantes de muestreo. Entonces, el condensador se reemplaza por un integrador. Ya que los pulsos se eligieron proporcionales a  $u$  y no a  $u-y$ , es necesario anular la integral cada vez que llega un nuevo pulso. por consiguiente, la corriente se representa por

$$i^* = um \quad (2-8)$$

donde

$$m(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) \quad (2-9)$$

y  $\delta$  es la función delta. La señal  $i^*$  se denomina *representación muestreada* de la señal continua  $i$ . Resulta útil recordar que  $i^*$  está relacionada con la corriente a través del condensador del circuito muestreador y mantenedor de la **figura 2-2**.

La señal  $i^*$  puede considerarse como una modulación de  $i$  por una señal portadora de la forma de un tren de impulsos. El modelo, por tanto, se denomina *modelo de modulación por tren de impulsos*. La señal  $i^*$  contiene la misma información que la secuencia  $\{i(nT), n = \dots, -1, 0, 1, \dots\}$ . Debe notarse, sin embargo, que  $i^*$  es una función (generalizada) del tiempo. La señal  $i^*$  se introduce para representar una señal muestreada de modo que pueda procesarse con un filtro lineal.

**Circuito mantenedor.**

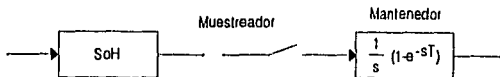
El circuito mantenedor puede representarse como un integrador que se anula automáticamente después de un período de muestreo. Tal sistema tiene la función de transferencia

$$G(s) = \frac{1}{s} (1 - e^{-sT}) \quad (2-10)$$

La respuesta a un impulso de la función de transferencia  $1/s$  es un escalón unidad y la respuesta a un impulso de  $(1/s)\exp(-sT)$  es un escalón unidad retardado  $T$  unidades de tiempo. La diferencia de ambas respuestas da como resultado a un pulso de altura unidad y duración  $T$ .

Obsérvese que la ganancia en estado estacionario del circuito mantenedor es  $G(0)=T$ . Un muestreo ideal tiene una ganancia  $1/T$ . Por tanto, la combinación de un muestreador y un mantenedor deben tener una ganancia unitaria en estado estacionario. De este modo, para muestreos rápidos, el circuito muestreador y mantenedor actúa como un sistema continuo con función de transferencia unitaria.

En este caso, el modelo idealizado para el circuito muestreador y mantenedor se obtiene combinando un muestreador con modulación de impulso definido por (2-8) y (2-9) con un circuito mantenedor definido por (2-10). Una representación en diagrama de bloques para este sistema se muestra en la **figura 2-8**. Ya que el modulador de impulsos es un sistema periódico, se deduce que el muestreador y mantenedor también es un sistema periódico.



**FIGURA (2-8). DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN CIRCUITO MUESTREADOR Y MANTENEDOR Y SU REPRESENTACION IDEALIZADA.**

## 2.2 RESPUESTA EN FRECUENCIA.

Como se dijo anteriormente el sistema de control se puede dar en el dominio de la frecuencia, y es que podemos ahora estudiar el mismo, pero ahora desde el punto de vista del proceso. Este método de la respuesta en frecuencia es complicado, ya que se involucra en el terreno de Nyquist y Bode; además de funciones de transferencia, etc. En el año de 1939-45 durante la segunda guerra mundial tiene un repunte la investigación en este campo de la ingeniería, ya que se trata de desarrollar sistemas de control que puedan aumentar la eficacia de los procesos de manufactura en armamento; adentrándose en diferentes áreas el uso de la respuesta en frecuencia en ramas como la mecánica, aeronáutica, naval y posteriormente en el campo de la química. Importantes reportes escritos por Brown and Hall<sup>5</sup> son circulados entre los científicos e ingenieros, que pronto aceleran el fin de la guerra; además de un sin número de publicaciones clásicas y textos, en los que convienen y disponen en resultados extensos de diseminar y adoptar las ideas de la respuesta en frecuencia, con lo que se logra una total y eficaz manera de solución a sistemas de control implementando este método.

El desarrollo de las técnicas en computación digital pronto guiaron adicionalmente el trabajo sobre los sistemas de tiempo discreto. Los sistemas de control digital operan sobre plantas de tiempo continuo con técnicas de análisis, pero pueden habilitar a ambos: es decir, en tiempo discreto y en tiempo continuo, con una interconexión (A/D y D/A) apropiada entre ambos y donde puede enfocarse desde un solo punto de vista.

Como dato al lector el método de la respuesta en frecuencia fue estudiado y modelado por Tsytkin<sup>6</sup>. Más tarde, analizado por medio de la transformada Z y su teoría de sistemas descrito por ecs. en diferencia, transformada S, ecuaciones diferenciales; en diferentes tratados y libros de texto por Ragazzini y Franklin<sup>7</sup>, Jury<sup>8</sup> y Freeman<sup>10</sup>.

---

<sup>5</sup> H.M. James, N.B. Nichols, *Theory of servomechanisms*, New York, 1947.

<sup>6</sup> Ya. Z. Tsytkin, *Frequency method of analysing intermittent regulating systems*, New York, 1956.

<sup>7</sup> J.R. Ragazzini, G. Franklin, *Sampled-data control systems*, New York, 1958.

<sup>8</sup> E.I. Jury, *Sampled-data control systems*, New York, 1958.

Este término de "respuesta en frecuencia"<sup>11</sup> se entiende como la respuesta en estado de régimen permanente, de un sistema ante una entrada sinusoidal. En los métodos de respuesta en frecuencia, los métodos más convencionales disponibles para los ingenieros de control para efectuar el análisis y diseño de sistemas de control, se varía la frecuencia de la señal de entrada en un cierto rango y se estudia la respuesta de frecuencia resultante.

### *Un caso especial.*

Cuando se realiza el ensayo de respuesta en frecuencia es normal cortar el lazo de realimentación de la parte analógica, por ejemplo, en el punto A de la figura 2-9. Para simplificar el análisis consideremos el caso especial en el cual la salida del convertidor (D/A) es igual a la entrada del convertidor (A/D). La labor del computador sobre las señales puede describirse, en este caso, como un circuito muestreador y mantenedor. En la figura 2-8 se comprueba que un circuito muestreador y mantenedor puede representarse como un muestreador seguido de un circuito mantenedor. El problema se reduce al cálculo de la respuesta de un muestreador seguido de un sistema lineal invariante en el tiempo.

La ecuación (2-8) proporciona la representación muestreada  $u^*$  de la señal de entrada  $u$ . Una representación formal en serie de Fourier de una secuencia de funciones delta da

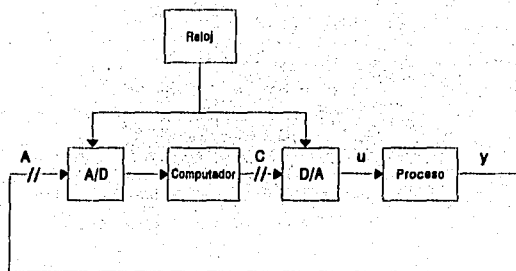
$$m(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-nT) = \frac{1}{T} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos n\omega_s t \right] \quad (2-11)$$

donde  $T$  es el período de muestreo y  $\omega_s$  es la frecuencia de muestreo correspondiente en radianes por segundo.

<sup>9</sup> E.I. Jury, Theory and application of the Z-transform method, New York, 1964.

<sup>10</sup> H. Freeman, Discrete-time systems, New York, 1965.

<sup>11</sup> Katsuhito Ogata, Ingeniería de control moderna, cap. 9, pag. 406.



**FIGURA (2-9). DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN SISTEMA CONTROLADO POR COMPUTADORA.**

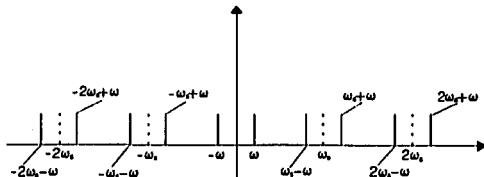
Supongamos que la entrada al sistema es:

$$u(t) = \text{sen}(\omega t + \varphi) = \text{Im}[\exp j(\omega t + \varphi)]$$

El desarrollo en serie de la salida  $u^* = u_m$  del muestreador es:

$$\begin{aligned} u'(t) &= \frac{1}{T} \left[ \text{sen}(\omega t + \varphi) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos(n\omega_s t) \text{sen}(\omega t + \varphi) \right] \\ &= \frac{1}{T} \left\{ \text{sen}(\omega t + \varphi) + \sum_{n=1}^{\infty} [\text{sen}(n\omega_s t + \omega t + \varphi) - \text{sen}(n\omega_s t - \omega t - \varphi)] \right\} \end{aligned}$$

La señal  $u^*$  tiene una componente con la frecuencia  $\omega$  de la señal de entrada. Esta componente está multiplicada por  $1/T$  que es la ganancia del muestreador en estado estacionario. La señal también tiene componentes correspondientes a las *bandas laterales*  $T\omega_s \pm \omega$ . El contenido de frecuencia de la salida  $u^*$  del muestreador se representa en la **figura 2-10**. La señal de salida  $y$  se obtiene por filtrado lineal de la señal  $u^*$  mediante un sistema de función de transferencia  $F(s)$ . De este modo, la salida tiene componentes a la frecuencia fundamental  $\omega$  y en las bandas laterales  $n\omega_s \pm \omega$ .



**FIGURA (2-10).** CONTENIDO DE FRECUENCIA DE LA SEÑAL DE ENTRADA MUESTREADA  $u^*$ .

Para  $\omega \neq n\omega_N$ , donde  $\omega_N$  es la frecuencia de Nyquist, la componente fundamental de la salida es:

$$y(t) = \frac{1}{T} \operatorname{Im} \{ F(j\omega) e^{j(\omega t + \varphi)} \}$$

Para  $\omega = n\omega_N$  la frecuencia de una de las bandas laterales coincide con la frecuencia fundamental. De este modo, a la componente de frecuencia  $\omega$  contribuyen dos términos. Esta componente es:

$$\begin{aligned} y(t) &= \frac{1}{T} \operatorname{Im} \{ F(j\omega) e^{j(\omega t + \varphi)} - F(j\omega) e^{j(\omega t - \varphi)} \} \\ &= \frac{1}{T} \operatorname{Im} \{ (1 - e^{-2j\varphi}) F(j\omega) e^{j(\omega t + \varphi)} \} \\ &= \frac{1}{T} \operatorname{Im} \{ 2e^{jn\pi/2} \operatorname{sen} \varphi F(j\omega) e^{j(\omega t + \varphi)} \} \end{aligned}$$

Si la señal de entrada es senoidal de frecuencia  $\omega$ , se encuentra que la salida contiene la frecuencia fundamental  $\omega$  y las bandas laterales  $n\omega_{\pm}$ ,  $n=1,2,\dots$ . La transmisión de la frecuencia fundamental se caracteriza por

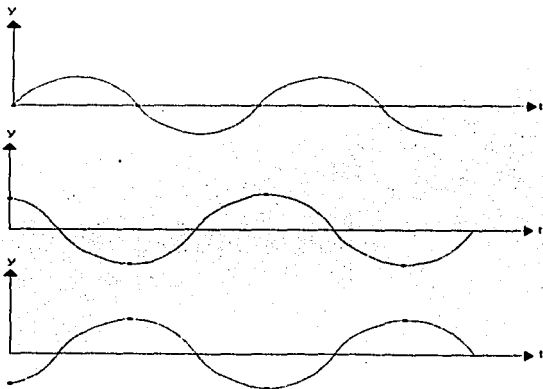
$$F(j\omega) = \begin{cases} \frac{1}{T} F(j\omega) & \omega \neq n\omega_N \\ \frac{2}{T} F(j\omega) e^{jn\pi/2} \operatorname{sen} \varphi & \omega = n\omega_N \end{cases} \quad (2-12)$$

Para  $\omega \neq n\omega_N$ , la transmisión se caracteriza simplemente por una combinación de la función de transferencia del circuito muestreador y mantenedor y el sistema G. El factor  $1/T$  se debe a la ganancia del muestreador en estado estacionario.

El hecho de que la transmisión de la señal a la frecuencia de Nyquist  $\omega_N$  dependa críticamente de  $\varphi$  es decir, de como se sincroniza la señal senoidal de entrada con los instantes de muestreo se ilustra en la **figura 2-11**.

Pueden existir interferencias entre las bandas laterales y la frecuencia fundamental, las cuales pueden producir irregularidades en la salida del sistema. Por lo que hay que filtrar las frecuencias de las bandas laterales, dando lugar a que el sistema se presente como lineal e invariante en el tiempo, excepto en las frecuencias que son múltiplos de la frecuencia de Nyquist,  $\omega_s/2$ . A esta frecuencia, la amplitud y el retardo de fase dependen del desplazamiento de fase de la entrada respecto a los instantes de muestreo.

Si se intenta determinar la respuesta en frecuencia de un sistema muestreado utilizando las propias técnicas de la respuesta en frecuencia, es importante filtrar eficazmente las bandas laterales. Incluso con un filtrado perfecto se presentarán problemas en la frecuencia de Nyquist. El resultado depende críticamente del modo en que se sincronice la entrada con el reloj del sistema.



**FIGURA (2-11). MUESTREO DE UNA SEÑAL SINUSOIDAL A UNA FRECUENCIA QUE CORRESPONDE A LA FRECUENCIA DE NYQUIST.**



**El caso general.**

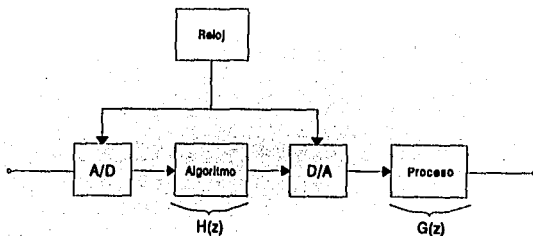
Es fácil extender el análisis al caso general del sistema mostrado en la **figura 2-9**. El correspondiente sistema en lazo abierto se muestra en la **figura 2-12**. Está formado por un convertidor (A/D), el computador, un convertidor (D/A), y el proceso. Se supone que el convertidor (D/A) mantiene la señal constante durante un intervalo de muestreo. También se supone que los cálculos efectuados por el computador pueden expresarse por la función de transferencia discreta  $H(z)$  y que el proceso se describe por la función de transferencia  $G(s)$ .

Si se aplica una senoide:

$$v(t) = \text{sen}(\omega t + \varphi) = \text{Im}\{e^{i(\omega t + \varphi)}\}$$

a un convertidor (A/D), el computador generará una secuencia de pulsos que en el estado estacionario puede describirse por:

$$w(nT) = \text{Im}\{H(e^{i\omega T})e^{i(\omega nT + \varphi)}\}, \quad n = \dots, -1, 0, 1, \dots$$



**FIGURA (2-12). SISTEMA CONTROLADO POR COMPUTADOR EN LAZO ABIERTO.**

Esta secuencia se aplica al convertidor (D/A). Como el convertidor (D/A) mantiene la señal constante durante un período de muestreo, la salida es similar a la obtenida cuando se aplica una señal  $\omega$  directamente a un circuito mantenedor. De este modo, se puede aplicar la discusión de la sección anterior: la salida contiene la componente fundamental de frecuencia  $\omega$  y las bandas laterales  $n\omega, \pm \omega$ . La transmisión de señal de la componente fundamental puede describirse por la función de transferencia:

$$K(k\omega) = \begin{cases} \frac{1}{T} H(e^{j\omega T}) F(j\omega) & \omega \neq n\omega_N \\ \frac{2}{T} H(e^{j\omega T}) F(j\omega) e^{j(n/2-\varphi)} \operatorname{sen} \varphi & \omega = n\omega_N \end{cases} \quad (2-13)$$

donde  $\omega_N$  es la frecuencia de Nyquist y

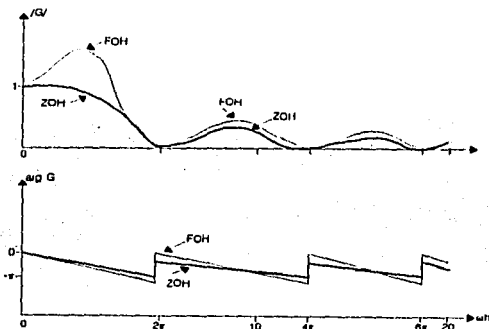
$$F(s) = \frac{1}{s} (1 - e^{-sT}) G(s) \quad (2-14)$$

Cuando  $\omega$  no es múltiplo de la frecuencia de Nyquist, la transmisión de señal de la componente fundamental se caracteriza por una función de transferencia que es el producto de cuatro términos: la ganancia  $1/T$  del muestreador, la función de transferencia discreta  $H[\exp(sT)]/s$  del circuito mantenedor, la función de transferencia discreta  $H[\exp(sT)]$  del algoritmo del computador, y la función de transferencia  $G(s)$  del proceso. Obsérvese, sin embargo, que hay otras frecuencias en la salida del sistema debidas al muestreo. A la frecuencia de Nyquist la componente fundamental y la banda lateral inferior coinciden.

Se deduce de la exposición que el circuito mantenedor puede interpretarse como un filtro. Las funciones del circuito mantenedor de orden cero y de primer orden se muestran en la **figura 2-13**. Se observa claramente en la figura que ambos mantenedores permiten una transmisión significativa de la señal para frecuencias superiores a la de Nyquist  $\omega_N = \pi/T$ . Obsérvese que la curva de fase es discontinua para los argumentos  $\omega T = 2n\pi, n=1,2,\dots$ . Ya que la fase tiene módulo  $2\pi$ , las discontinuidades pueden ser  $\pi$  o  $-\pi$ . En la figura se muestran únicamente en  $\pi$  por conveniencia.

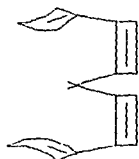
Bien, se ha tratado de simplificar al máximo el método de respuesta en frecuencia, el cual pues es demasiado complicado, además de que no estamos adentrándonos en las técnicas de solución, como diagramas de Bode, transformada de Laplace, transformada  $z$ , etc.; los cuales ya se tuvieron que haber visto en la materia de control analógico, control digital, ingeniería de sistemas, y las bases matemáticas de tronco común, a lo largo de la carrera. Si se desea adentrar más en este tema existe un gran número de libros acerca del tema.

Como vemos el surgimiento de la computadora digital es confiable, amplio y aprovechable en la ingeniería, y es a partir de los 50's en que toma un auge en el desarrollo de sistemas de control, por lo que se hace un requisito indispensable en el análisis y diseño de los mismos. El computador, tiene una gran versatilidad, haciendo cálculos que prácticamente resultarían muy intrincados, realmente su poder es ilimitado y muy pronto tendrán la posibilidad de implementarse en más ámbitos del control, así como demás proyectos sin precedente, con una gran rapidez y flexibilidad para la ingeniería en general.



**FIGURA (2-13). CURVAS DE MODULO Y ARGUMENTO DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LOS CIRCUITOS MANTENEDORES DE ORDEN CERO Y DE PRIMER ORDEN.**

# CAPÍTULO



<< LA CIENCIA ES EL ALMA DE LA  
PROSPERIDAD DE LAS NACIONES Y  
LA FUENTE DE TODO PROGRESO. >>

LOUIS PASTEUR (1822-1895).  
QUIMICO Y BIOLOGO FRANCÉS.

**CONTROL  
POR  
COMPUTADORA.**

---

### 3.1 INTRODUCCION.

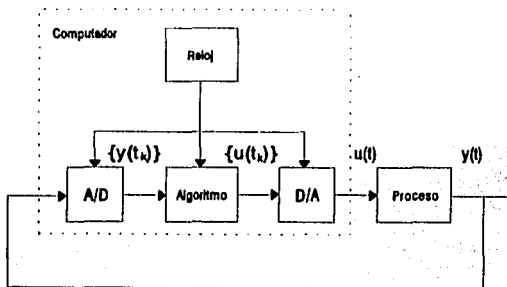
Las computadoras digitales han tenido un incremento cada vez mayor para realizar sistemas de control. Esto es muy importante, comprenderlo bien ya que los sistemas de control por computadora dependerán directamente de las señales de actuadores y accionamientos que mueven las instalaciones de producción, además de que sensores indican estados y valores de medición. Datos preestablecidos velan por un desarrollo automático en combinación con un programa de control. Los sistemas controlados por computadora los podemos ver como una aproximación de los sistemas controlados analógicamente, pero este es un tratamiento pobre, porque todo el potencial del control por computadora no es utilizado. En el mejor de los casos los resultados serán solamente tan buenos como los obtenidos con control analógico. Otra alternativa es estudiar los sistemas controlados con computadora, de forma que se explote al máximo el propio control por computadora.

Anteriormente se ha descrito un sistema controlado por computadora, y los seguiremos estudiando aunque con pequeñas variantes que poco a poco van haciendo un sistema de control más completo. Veamos pues como lo indica la **figura 3-1**, en donde la salida del proceso  $y(t)$  es una señal de tiempo continuo, dicha salida es convertida a una forma digital por medio de un convertidor analógico-digital (A/D). El convertidor (A/D) puede incluirse en el computador o considerarse como una unidad separada, según la preferencia de cada uno. La conversión se realiza en el tiempo de muestreo,  $t_k$ . La computadora interpreta las señales ya convertidas,  $\{y(t_k)\}$ , como una secuencia de números, procesa las medidas usando un algoritmo y genera una secuencia de números,  $\{u(t_k)\}$ . Esta secuencia es convertida en una señal analógica por medio de un convertidor digital-analógico (D/A). Note que el sistema funciona en lazo abierto en el intervalo entre las conversiones (A/D) y (D/A). Los eventos son sincronizados por medio de un reloj de tiempo real de la computadora. La computadora digital opera secuencialmente en el tiempo, y cada operación dura un cierto tiempo. El convertidor debe, sin embargo, producir una señal de tiempo continuo. Esto se realiza normalmente manteniendo constante la señal de control entre las conversiones. El sistema de control por computadora contiene señales de tiempo continuo y *muestreadas*, o señales de tiempo *discreto*.

Estos sistemas tradicionalmente se han llamado *sistemas de datos muestreados*, y este término es el que se usa aquí como sinónimo de *sistemas controlados por computadora*.

La mezcla de diferentes tipos de señales a veces causa dificultades. Sin embargo en muchos de los casos es suficiente con describir el comportamiento del sistema en los instantes de muestreo. Entonces las señales que únicamente interesan son las de instantes discretos. A los sistemas de este tipo les denominaremos *sistemas discretos*. Los sistemas discretos tratan secuencias de números, por lo que una forma natural de representarlos es mediante ecuaciones en diferencias. Que como recordaremos ya estudiamos en el capítulo 1 del presente trabajo.

El propósito de este capítulo es dar los conocimientos básicos de cómo se ha ido desempeñando la teoría del control a lo largo de la historia, así como un enfoque y tendencias de la tecnología implantada en sistemas de control por computadora.



**FIGURA (3-1). DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN SISTEMA CONTROLADO CON COMPUTADORA.**

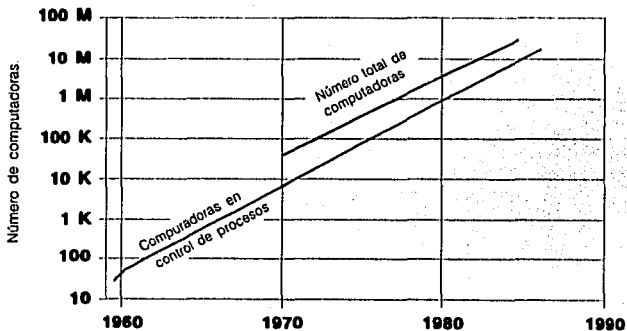
### 3.2 TECNOLOGIA DE COMPUTADORES.

La idea de utilizar computadoras digitales como componentes de sistemas de control surgió alrededor de 1950. Las primeras investigaciones aplicadas fueron en el campo del control de misiles y de aviones. Los estudios mostraron que no era posible utilizar las computadoras digitales disponibles en aquel tiempo. Pues estas eran demasiado grandes, consumían mucha potencia y no eran suficientemente confiables. Por esta razón especial se crearon computadoras de propósito especial -analizadores diferenciales digitales ( DDA, de Digital Differential Analyzers )- para las primeras aplicaciones aeroespaciales.

Los desarrollos más importantes en el control por computadora ocurrieron en las industrias de proceso. El progreso de este desarrollo se ilustra en la **figura 3-2**, que muestra el crecimiento de número de computadoras usadas en control de procesos durante los últimos 25 años.

Por otra parte, la idea de utilizar las computadoras digitales para el control de procesos surgió a mitad de los años cincuenta. Pero de manera específica comenzó en marzo de 1956 cuando la compañía aeroespacial Thomsom Ramo Woolridge (TRW) contacto con Texaco para realizar un estudio de factibilidad. Después de conversaciones preliminares se decidió probar en una unidad de polimerización de la refinería de Port Arthur, Texas. Un grupo de ingenieros de TRW y Texaco hicieron el estudio de factibilidad completo, que requirió alrededor de 30 hombres/año. Así pues, se diseñó un sistema de control por computadora para la unidad de polimerización basado en un computador RW-300. El sistema de control se puso en marcha el 12 de marzo de 1959. El sistema controlaba 26 flujos, 72 temperaturas, 3 presiones y 3 composiciones. Las funciones esenciales eran minimizar la presión del reactor, determinar la distribución óptima entre la alimentación de los cinco reactores, controlar la entrada de agua caliente a partir de la actividad catalítica y determinar la recirculación óptima.

Muchos fabricantes de computadoras, que vieron un gran mercado potencial para sus productos, tomaron nota del trabajo de pioneros realizado por TRW. Se iniciaron muchos estudios de factibilidad diferentes y comenzó un desarrollo muy activo. El resultado de estos esfuerzos se refleja en el crecimiento que presenta la figura 3-2.



**FIGURA (3-2). CRECIMIENTO DEL NUMERO DE COMPUTADORAS EMPLEADAS PARA EL CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES. PARA PODER COMPARAR SE DA TAMBIEN EL NUMERO TOTAL DE COMPUTADORAS.**



Es difícil dar fechas precisas de los cambios tecnológicos que ha tenido el control por computadora. Además de que hubo una gran diferencia en distintas áreas de aplicación y diferentes industrias. Pero trataremos de ir las conociendo en base a una cronología en la que aparecieron estas nuevas ideas sobre el control. Estos periodos son:

- Período de los pioneros = 1955
- Período de control digital directo = 1962
- Período del minicomputador = 1967
- Período del microcomputador = 1972

#### *Período de los pioneros.*

Como dijimos anteriormente muchas industrias de computadoras vieron que tenían un mercado potencial en el campo industrial de procesos. Por lo que se dedicaban a estudiar esta nueva tecnología, y lograr así, lo que ellos suponían sería un control de procesos por computadora adecuado. Los sistemas de computadoras que se utilizaban entonces eran lentos, caros y poco fiables. Los sistemas primitivos empleaban válvulas de vacío. Datos típicos de un computador de alrededor de 1958 son: un tiempo de suma de 1 ms, un tiempo de multiplicación de 20ms y un tiempo medio entre fallos ( MTBF, de Mean Time Between Failures ) de entre 50 y 100 horas para la unidad central. Como tenían tan poca fiabilidad, controlaban el proceso imprimiendo instrucciones al operador del proceso o cambiando las consignas de los reguladores analógicos. A estas formas de operación se les conocía como *guía del operador y control de consigna*. Para realizar una optimización, hacían falta los modelos matemáticos de los procesos, pero estos eran demasiado complicados ya que se obtenían de los modelos físicos de los procesos y del análisis de regresión de los datos del proceso.

A menudo los avances se veían entorpecidos por una falta de conocimientos del proceso. También fue quedando claro que no era suficiente con ver simplemente los problemas como cuestiones de optimización estática; hacían falta modelos dinámicos. Una parte significativa de los estudios de factibilidad estaban dedicados al modelado, lo que consumía bastante tiempo debido a la falta de una buena metodología de modelado.

Durante los estudios de factibilidad se adquirió una gran experiencia. Se vio claramente que el control de procesos impone a las computadoras unas exigencias especiales. La necesidad de una rápida respuesta a las peticiones del proceso llevó a desarrollar la *característica de las interrupciones*, que consiste en un dispositivo físico especial que permite a un acontecimiento exterior interrumpir a la computadora en el trabajo que está haciendo para que pueda responder a tareas del proceso que son más urgentes. Muchos de los sensores que se necesitaban no estaban disponibles.

En marzo de 1961 se habían instalado 37 sistemas. Un año más tarde el número de sistemas había crecido hasta 159. Las aplicaciones fueron diversas y los estudios de factibilidad continuaron a lo largo de los años 60 y los 70.

#### *Periodo de control digital directo.*

Las primitivas instalaciones de computadores de control operaban en modo supervisor, bien como guía de operador, bien como control consigna. Imperial Chemical Industries (ICI) en Inglaterra se apartó drásticamente en este enfoque en 1962. Se sustituyó la totalidad de la instrumentación analógica de control de procesos por una computadora, un Argus de Ferranti. La computadora medía 224 variables y controlaba 129 válvulas directamente. Era el comienzo de una nueva era en el control de procesos: simplemente la tecnología analógica se sustituía directamente por la tecnología digital; la función del sistema era la misma. Se acuñó el nombre *Control Digital Directo* ( DDC, del inglés Direct Digital Control ) para destacar que la computadora controlaba el proceso directamente. En 1962 un típico computador de control de procesos podía sumar dos números en 100  $\mu$ s y multiplicarlos en 1 ms. El MTBF era de alrededor de 1.000 horas.

El costo era el principal motivo para cambiar la tecnología. Ya que el costo de la tecnología analógica se incrementaba linealmente con el número de lazos de control; se podía invertir inicialmente en una computadora digital con un costo alto, pero el costo de añadir un lazo era pequeño. El sistema digital era entonces más barato para los sistemas grandes. Otra ventaja era que la comunicación con el operador podía cambiar de forma drástica; Ya que un gran panel de instrumentos de medición podía sustituirse por un sistema muy sencillo: una pantalla digital y unos pocos pulsadores.

La flexibilidad era otra de las ventajas de los sistemas DDC. Los sistemas analógicos se cambiaban recableándolos; los sistemas controlados por computadora lo eran reprogramándolos. La tecnología digital ofrecía también otras ventajas. Era fácil realizar interacciones entre varios lazos de control. Los parámetros de un lazo de control podían hacerse función de las condiciones de operación. La programación se simplificaba introduciendo lenguajes especiales para DDC. Un usuario de un lenguaje de este tipo no necesitaba saber nada sobre programación, sino simplemente introducir las entradas, salidas, tipos de reguladores, factores de escala y parámetros de los reguladores en unas tablas. Sólo que era difícil de realizar estrategias de control no convencionales.

El DDC fue un cambio de dirección fundamental en el desarrollo de los sistemas controlados por computadora. El interés se centró en las funciones básicas de control en lugar de hacerlo en las funciones de supervisión de los sistemas anteriores.

#### *Período del minicomputador.*

Durante los años 60 hubo un desarrollo sustancial en la tecnología de las computadoras digitales. Lo cual se logró gracias al progreso que la electrónica tuvo en el desarrollo de circuitos integrados. Las computadoras resultaban más pequeñas, más rápidas, más fiables y sobre todo económicas. Se elaboró el término *minicomputador* para las nuevas computadoras que surgieron.

Pronto se vio el nuevo auge, fue entonces que varios fabricantes anunciaron computadoras especiales para control de procesos. Una computadora de procesos típica de ese período tenía una longitud de palabra de 16 bits. La memoria principal era de 8 K a 124 K palabras. Se solía emplear un disco como memoria secundaria. Como ejemplo tenemos el CDC 1700, con un tiempo de suma de 2  $\mu$ s y un tiempo de multiplicación de 7  $\mu$ s. El MTBF de la unidad central era de alrededor de 20,000 horas.

Un factor importante en el rápido incremento del control por computadora en este período fue que el control digital con computadora ahora venía en "unidades" más pequeñas. Esto permitía utilizar el control con computadora para proyectos menores y para problemas más pequeños.

### ***Periodo del microcomputador.***

Con la llegada del microcomputador en 1972, los costos se redujeron considerablemente, así pues había que tener en cuenta, que en la práctica, el control por computadora podía ser una alternativa, sin importar lo reducido del tamaño de la aplicación.

Durante la década de los 80 también se han producido desarrollos en el ámbito de la microelectrónica con la tecnología VLSI. Los microcomputadores ya han producido un impacto apreciable sobre los equipos de control: estos están sustituyendo a los circuitos analógicos incluso en los controladores de un sólo lazo; se han producido pequeños sistemas DDC empleando microcomputadores; la comunicación con el operador se ha mejorado extraordinariamente en estos sistemas con la introducción de pantallas gráficas de color; se han construido sistemas jerarquizados de control con un gran número de microcomputadores y se han diseñado reguladores de propósito especial basados en microcomputadores.

### ***Los sistemas de instrumentación y control de procesos y el avance tecnológico.***

El avance naturalmente no se detiene en el campo de las computadoras, por el contrario, su ritmo es todavía mayor. Un signo especialmente perceptible de este progreso es la creciente reducción de tamaño de los equipos, en razón de la progresiva miniaturización de los componentes electrónicos. Los sistemas de control e instrumentación de procesos se caracterizan porque contienen equipos de medida, control y regulación así como elementos para la observación y manipulación de los procesos. Los distintos equipos están vinculados entre sí por un sistema de comunicación común. Los equipos del sistema tienen instalados paquetes de software previamente confeccionados en forma de módulos funcionales para las funciones básicas, lo cual permite estructurar las funciones correspondientes a las respectivas tareas sin poseer conocimientos de programación.

No es nada difícil darse cuenta del origen de los actuales sistemas de instrumentación y control de procesos. Algunos vienen del ámbito de las técnicas clásicas de medición y regulación, otros tienen su origen en los métodos de mando y control, y hay otros que tienen la clásica estructura de los computadores de proceso configurados en red. Ante este telón de fondo no es de extrañar que, pese a las buenas experiencias con los sistemas de instrumentación y control de procesos utilizados hasta ahora, sea necesario mejorar y completar gran número de puntos. Los defectos comprobados por regla general no reducen ni la aplicabilidad, ni la función ni la disponibilidad del sistema, sino que dificultan el manejo global, la eliminación de averías, la configuración y la manipulación del sistema de control. El permanente desarrollo por parte de los fabricantes, utilizando nuevos componentes y tecnologías, permite esperar un mayor perfeccionamiento de los sistemas de instrumentación y control de procesos. Aunque las tendencias de desarrollo de los periféricos, de los sistemas de sensores y actuadores se encuentran en gran medida abiertas, el marco del desarrollo del nivel de proceso está prácticamente perfilado.

El enorme avance de la técnica de control de procesos ha sido posible gracias al enorme incremento de la relación entre capacidad y precio de la microelectrónica. Fue lo que hizo posible la transición del procesamiento de datos centralizado al descentralizado en el ámbito técnico. Permitió reemplazar la gran variedad de equipos por programas modulares para numerosas aplicaciones.

Estos factores contribuyen a obtener ventajas económicas a la hora de planificar sistemas de control de procesos frente a la técnica convencional. Además de sus ventajas cuantificables, los sistemas de control de procesos permiten el registro continuo de todas las intervenciones en un proceso. Seleccionan los datos necesarios para la realización de un proceso, sin saturar al operador con una cantidad excesiva de información. El manejo y la observación de las alternativas de un proceso se efectúan por medio de pantallas, que sustituyen a los equipos individuales de medición y actuación.

Pero estas ventajas son la razón más importante para preferir el uso de los sistemas de control de procesos por computadora. Contrariamente a la técnica convencional, tales sistemas crean las condiciones para la realización de funciones complementarias, p. ej. la realización de fórmulas y la logística del proceso así como la creación de sistemas de información.

Podemos decir que esta técnica a conducido a mejoras en la realización de los procesos y de la fabricación, pero sobre todo a una mayor seguridad. Pero el objetivo no es de ningún modo la fábrica fantasma despoblada, sino una mejor comunicación entre el hombre y el proceso en su sentido más amplio. No es la operación automatizada sino la dirigida de manera óptima y segura la que pretenda alcanzar en la industria de procesos. Tampoco será posible confiar en un futuro próximo las operaciones del proceso y de la producción a un sistema controlado por computadora. El hombre sigue siendo el centro en torno al cual gira la conducción del proceso. Pero gracias a la nueva técnica tendrá a su disposición no sólo recursos mejorados sino instrumentos de una calidad totalmente novedosa.

### 3.3 ALGORITMOS DE COMPUTADOR.

En los primeros años del proceso electrónico de datos se procuró buscar soluciones a partir de las diversas concepciones correspondientes a los sistemas de información de gestión empresarial, basados en arquitecturas de computadores centralizadas y cerradas. Se procuraba reproducir en el computador todas las situaciones del usuario en un modelo cerrado y confiar la toma de decisiones a algoritmos de optimización.

Con el correr del tiempo se ha comprobado —y la evolución técnica lo tiene en cuenta— que con arquitecturas distribuidas de proceso de datos y sistemas abiertos, que incluyen al hombre como ente que adopta decisiones, brindan los más eficaces supuestos para sistemas de información. Esto es particularmente válido para la industria de procesos. Las estructuras basadas en los modelos de fase y nivel resultan de la aplicación de esta teoría. Los módulos de un sistema divididos de acuerdo a puntos de vista funcionales y topológicos son en gran medida accesibles, permitiendo una suficiente comunicación entre ellos. Gracias a interfases interactivas el hombre puede intervenir en todos los puntos, en tanto que unos algoritmos de optimización apoyan su toma de decisiones.

Un algoritmo de control lo podemos representar de diferentes formas, por ejemplo, un controlador proporcional e integral (PI), un algoritmo sencillo es el siguiente:

uc: adin (in1)	{ Leer valor de referencia }
y: adin (in2)	{ Leer valor proceso }
e: uc-y	
u: k*(e+i)	
dout (u)	{ Sacar señal de control }
i: =i+h*e/11	

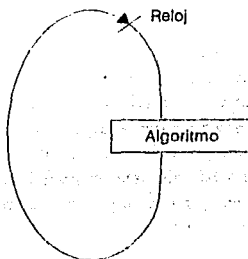
Donde, **uc** variables de proceso; **y** valor actual de proceso; **u** función de transferencia; **k** es el período; **h** número de iteraciones.

El programa se ejecuta cada periodo de muestreo por un programa de planificación temporal, como se ilustra en la figura 3-3. El código de computador es equivalente al siguiente conjunto de ecuaciones en diferencias:

$$e(k) = uc(k) - y(k)$$

$$u(k) = k[e(k) + i(k-1)]$$

$$i(k) = i(k-1) + (he(k)/ti)$$



**FIGURA (3-7). PLANIFICACION DE UN PROGRAMA PARA COMPUTADORA.**

El algoritmo se desarrolló de un modo más analítico, como una solución a determinada función de transferencia. Pero ahora digamos que se da en forma natural debido al procedimiento o señal mandada por una medida hecha por el proceso.

Bien, como ya se ha explicado muchas veces se sigue el mismo procedimiento usando un convertidor (A/D), que es la interfase entre el proceso y la computadora. La señal enviada de un sensor (temperatura, presión, líquidos, etc) es muestreada y analizada en una secuencia de números; donde en base a un programa de computación o paquetes de software se toma la medición, generándose una respuesta que inmediatamente obedecerá el mecanismo o dispositivo para su activación o desactivación, que dará fin al proceso o a la tarea que se esté realizando.

Hoy en día la tecnología en programación y software permite muchas funciones tales como captar datos de medida, formar valores límite, controlar y regular. A esto se suman nuevas funciones que superan en mucho las problemáticas que se van presentando.



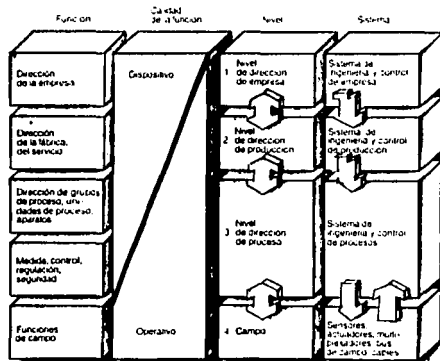
Son, en especial, funciones de material y ahorro de energía, lo que está haciendo cada vez más utilizables los paquetes de programación y desarrollo de algoritmos bastante eficaces.

Gracias al desarrollo de nuevos sistemas de manejo, las variables que intervienen en un proceso se visualizan ampliamente, con sus relaciones correctas, sobre pantallas, siendo más claros que los utilizados usualmente antes en las salas de control de grandes procesos. Antes, desde cada sensor y desde cada puerto de aviso, se tendían cables hacia los correspondientes instrumentos de indicación o aviso, lo que producía en la sala de mando una confusa cantidad de valores de medida, situaciones de alarma y avisos. En cambio, ahora toda la información importante para la dirección del proceso, se muestra en pocas pantallas, en forma cronológicamente compactada y técnicamente correcta. Esto se logra por el mencionado procesamiento intenso de datos, que presenta con claridad creciente las actividades del proceso. Pudiendo intervenir directamente en el desarrollo del proceso a través de la pantalla mediante un teclado o un lápiz óptico.

Entre los sistemas de operación y observación ubicados centralmente en la sala de control y los sistemas de automatización distribuidos localmente en el proceso, se intercambian una gran cantidad de datos y ordenes. Esto se realiza a través de un bus, que reemplaza gran cantidad de cables multifilares utilizados en sistemas anteriores, por cables coaxiales o conductores de fibras ópticas. Se forma así una estructura de dispositivos de ingeniería y control de proceso en la que los diferentes niveles precisan distintas informaciones. Estos niveles se disponen para que resulten condiciones y problemas de comunicación similares. De esta manera se simplifican las interfases y el trabajo de proyección. (figura 3-4).

La comunicación directa entre el sistema de control de procesos y las instalaciones de procesamiento de datos de los niveles superior (nivel de control de la producción y nivel de dirección empresarial), se va a estructurar cada vez más en el futuro. Una importante condición para ello es la normalización de interfases de comunicación. Este desarrollo va a crear enlaces entre las redes locales y las públicas, de manera tal que la comunicación no solamente se podrá desarrollar verticalmente desde el nivel directivo al nivel productivo, sino que también se podrá establecer en forma horizontal con las otras industrias.

Bien, hemos visto que el control de procesos mantiene su autonomía mediante su tecnología específica de medición y vigilancia, sus estrategias típicas de regulación y control y por sus problemas de la sensorica (sensores) y actórica (actuadores). Pero, en el futuro, deberá reforzar su orientación hacia el desarrollo de sistemas de automatización distribuida, hacia las redes locales con interfaces normalizadas y hacia el progresivo procesamiento de datos, con técnicas de bancos de datos y de métodos que experimentan un desarrollo paralelo. La normalización de las interfaces para las redes locales, está en pleno desarrollo. En las universidades y en los departamentos de desarrollo de la industria, se promueve la intervención teórica de procesos informáticos en la técnica para formar una nueva rama de la informática: la *informática de procesos*.



**FIGURA (3-4). EL MODELO DE NIVELES DE LA INGENIERIA Y CONTROL DE PROCESOS MUESTRA LAS FUNCIONES EN SISTEMAS Y APARATOS.**

### 3.4 TEORIA DE DESARROLLO.

Ahora veamos como se fue desarrollando esta teoría del control, en donde las aplicaciones más importantes se hicieron dentro del control por computadora. En esta sección se expondrá cuales fueron las ideas principales en el desarrollo de la teoría.

#### *El teorema de muestreo.*

Debido a que todos los sistemas controlados por computador operan sobre los valores de las variables de proceso solamente en los instantes de muestreo, es muy importante saber las condiciones bajo las cuales se puede reconstruir una señal a partir únicamente de sus valores en instantes discretos. El tema clave lo investigó Nyquist, quien mostró que para reconstruir una señal sinusoidal a partir de sus muestras es necesario muestrear al menos dos veces en cada período. La solución completa la dio Shannon en un importante trabajo en 1949.

#### *Las ecuaciones en diferencias.*

Las primeras investigaciones de una teoría de los sistemas muestreados aparecieron en conexión con el análisis de sistemas de control específicos. Una de las primeras contribuciones a la teoría fue el comportamiento de un galvanómetro estabilizado por un troceador investigado por Oldenburg y Sartorius (1948). Mostró cómo muchas propiedades podían comprenderse analizando una ecuación en diferencias lineal y de coeficientes constantes. La ecuación en diferencias sustituía a la ecuación diferencial en la teoría de los sistemas continuos. Por ejemplo, se podía estudiar la estabilidad con el método de Schur-Cohn, a su vez también se aplicaba el criterio de Routh-Hurwitz para sistemas discretos.

### *Los métodos de las transformadas.*

Durante y después de la Segunda Guerra Mundial se dedicó una gran cantidad de actividad al análisis de los sistemas de radar. Estos sistemas son de los intrínsecamente muestreados debido a que se obtiene una medida de posición por cada revolución de la antena. Como la teoría de la transformada había resultado tan útil para los sistemas continuos, era natural intentar desarrollar una teoría similar para los sistemas muestreados. El primer paso en esta dirección lo dio Hurewicz (1947). Introdujo la transformación de una secuencia  $\{ f(nT) \}$ , definida por:

$$Z\{f(nT)\} = \sum_{n=0}^{\infty} z^{-n} f(nT)$$

Esta transformación es similar a la *función generatriz*, que se había usado con tanto éxito en muchas ramas de las matemáticas aplicadas. Más tarde, habíamos mencionado, Ragazzini y Zadeh (1952) definieron la transformación como la *transformada z*. La teoría de la transformada se desarrolló de forma independiente en la Unión Soviética, los Estados Unidos y Gran Bretaña. Tsypkin (1950) la llamó la *Transformada discreta de Laplace* y desarrolló una teoría sistemática para los sistemas controlados por pulsos basada en la transformada. El método de la transformada fue desarrollado también de forma independiente por Barker (1952) en Inglaterra.

En los Estados Unidos Jury desarrolló el tema de forma más amplia en su tesis doctoral en la universidad de Columbia. Jury desarrolló herramientas tanto para el análisis como para el diseño. Demostró también que los sistemas muestreados podían ser mejores que sus equivalentes continuos. Jury también destacó que era posible obtener un sistema en lazo cerrado que alcanzara exactamente el estado estacionario en un tiempo finito. En trabajos posteriores demostró que el muestreo puede producir la cancelación de polos y ceros. Una investigación posterior más profunda de esta propiedad dio lugar a las nociones de observabilidad y alcanzabilidad.

Otra aproximación a la teoría de los sistemas muestreados fue la proporcionada por Linvill (1951). Siguiendo las ideas de MacColl (1945), consideró el muestreo como una modulación en amplitud. Empleando la aproximación de la función descriptiva, Linvill consiguió describir de forma eficaz el comportamiento entre instantes de muestreo. Otra

aproximación diferente del análisis del problema fue la *transformada z retardada*, que fue desarrollada por Tsytkin en 1950, Barker en 1951 y Jury en 1956. Se le conoce también como la *transformada z modificada*.

Al final de los años 50, la aproximación de la transformada  $z$  para los sistemas muestreados había madurado, y aparecieron casi simultáneamente varios libros de texto: Ragazzini y Franklin (1958), Jury (1958), Tsytkin, etc; los cuales ya mencionamos en el capítulo 2. (ver nota pie de pagina 5-10). Esta teoría, que se había creado siguiendo el modelo de la teoría de los sistemas lineales invariantes y continuos, proporcionó buenas herramientas para el análisis y la síntesis de los sistemas muestreados. Sólo fue preciso hacerle unas pocas modificaciones debido a la naturaleza variable en el tiempo de los sistemas muestreados.

#### *Teoría del espacio de estados.*

Un acontecimiento muy importante a finales de los años cincuenta fue el desarrollo de la teoría del espacio de estados. La inspiración principal vino por parte de las matemáticas y la teoría de las ecuaciones diferenciales ordinarias y de matemáticos tales como Lefschetz, Pontryagin y Bellman. A Kalman hay que atribuir el mérito del enfoque del espacio de estados en la teoría del control. Fue él quien formuló muchos de los conceptos básicos y resolvió muchos de los problemas importantes.

Varios de los conceptos fundamentales se elaboraron durante el análisis del problema de si sería posible obtener sistemas en los que las variables alcanzaran el estado estacionario en un tiempo finito. El trabajo de Kalman condujo también a una formulación mucho más simple del análisis de los sistemas muestreados: las ecuaciones básicas podían deducirse de forma sencilla comenzando con las ecuaciones diferenciales e integrándolas con la hipótesis de que la señal de control es constante durante el período de muestreo.

### *Control óptimo y control estocástico.*

Hubo también otros desarrollos importantes a finales de los cincuenta. Bellman (1957) y Pontryagin con otros (1962) demostraron que muchos problemas de diseño podían formularse como problemas de optimización. Para los sistemas no lineales esto llevó al cálculo de variaciones no clásico. Bellman y otros (1958) dieron una solución explícita para los sistemas lineales por medio de una expresión cuadrática. Kalman (1960) demostró en un célebre trabajo que el problema lineal cuadrático podía reducirse a la solución de una ec. de Riccati. También demostró que el clásico problema de filtrado de Wiener podía reformularse en el espacio de estados. Esto permitió dar una solución en forma de ecuaciones recursivas, lo que se adaptaba muy bien al cálculo con computador.

Al comienzo de los años sesenta se formuló un problema variacional estocástico suponiendo que las perturbaciones eran procesos aleatorios. Entonces se pudo formular y resolver el problema del control óptimo para sistemas lineales para el caso de funciones cuadráticas. Esto condujo al desarrollo de la teoría de control estocástico. El trabajo dio como resultado la llamada teoría Lineal Cuadrática Gaussiana (LQG). Esta es en la actualidad una herramienta fundamental de diseño para los sistemas multivariables.

### *Identificación de sistemas.*

Cuando se intentó aplicar la teoría a problemas prácticos quedó patente la necesidad de herramientas eficaces de modelado. Esta necesidad estimuló muchísimo la investigación sobre técnicas para obtener modelos directamente de los datos de la planta. Estos esfuerzos dieron como fruto una buena comprensión del problema y una gran cantidad de algoritmos.

La llegada del control por computadora ha hecho posible la realización práctica de algoritmos de control más complicados. Esto ha servido en mucho al control por computadora, ya que prácticamente están surgiendo nuevos tipos de control, uno de ellos lo es el control adaptativo, el cual ha demostrado ser de gran utilidad en estudios de viabilidad.

### 3.5 SISTEMAS CONTROLADOS POR COMPUTADORA.

Los avances en lo que respecta al control en la industria de procesos se caracterizan por la transición de una gestión a partir de señales a otra basada en el procesamiento de la información. Este cambio de filosofía ha sido posible gracias a la introducción de los microcomputadores para resolver tareas de medida, control y regulación. Se trata pues, de mostrar el mínimo posible de datos, pero tantos como sea necesario siempre y cuando se precisen en la forma más clara posible para el operador del sistema.

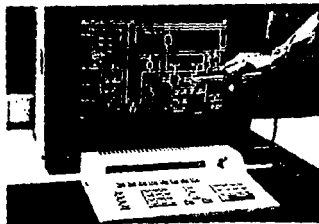
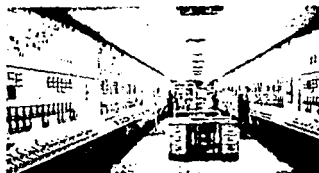
Los componentes distribuidos de los sistemas de control se hacen cargo de las funciones básicas de medida, control y regulación; al mismo tiempo, estos datos están siempre disponibles en los puestos de observación o activan alarmas en los casos de funcionamiento anómalos. Vease **figura 3-5**, donde notamos la gran diferencia entre una sala de control convencional y el poco espacio requerido para una computadora digital; además, de poder intervenir en el proceso por medio de un lápiz óptico o el teclado para llevar a cabo una acción.

Los sistemas de control por computadora en procesos basados en informaciones requieren la existencia de modelos para estructurar el conjunto de datos. Dicha estructuración está soportada por los modelos de nivel y de fase. El modelo de nivel parte de la agrupación de las tareas productivas y proporciona un sistema estructurado jerárquicamente. Describe el alcance de las funciones del nivel de control del proceso y marca las fronteras con el nivel de control de la producción y el nivel de gestión empresarial. Previamente mencionado.

El modelo de fase parte de la topología de los procesos y genera otra estructura. Esta herramienta complementa los esquemas, diseñados por el ingeniero proyectista, del proceso, de tuberías y de instrumentación y permite definir qué información debe estar disponible en cada paso concreto del proceso para su control y para la garantía de calidad. El modelo de fase es en resumidas cuentas el resultado de un análisis sistémico del proceso. Establece las premisas necesarias para representar el proceso conforme a un modelo. En ellas se basan a su vez las posibilidades de los sistemas complejos de regulación y los procesos de medida basados en modelos.

Los modelos de nivel y de fase profundizan el concepto de control e instrumentación de procesos orientados a la información. De ello resultan nuevas tareas y tendencias:

- Desarrollos en materia de captura y procesamiento de información que perfeccionan las funciones básicas del control e instrumentación de procesos (medición, control, regulación, manipulación, observación). Los progresos más importantes en este contexto son los logrados en el campo de los sensores y las mejoras en los sistemas de control de procesos.
- Otros desarrollos apuntan a una mayor utilización de funciones superiores, incluyendo entre otras las de procesar fórmulas, logística de procesos y producción, explotación regulada por modelos, conceptos de seguridad ampliados en la ingeniería de control así como extensos métodos de evaluación para definir modelos combinando datos a priori con datos procedentes del proceso.



**FIGURA (3-5).**

**SALA DE CONTROL CONVENCIONAL  
CON APARATOS E INSTRUMENTOS  
INDIVIDUALES EN LA INDUSTRIA  
QUIMICA.**

**PUESTO DE MANIPULACION  
EQUIPADO CON PANTALLA Y LAPIZ  
OPTICO (TELEPERM M).**



### 3.5.1 TIPOS DE CONTROL DE PROCESOS POR COMPUTADORA.

La situación antes de la aparición de las computadoras en el campo del control de procesos era que el control lo realizaban reguladores analógicos de un sólo lazo, ejecutados con las diferentes tecnologías existentes (principalmente neumática y electrónica).

#### *Computadora de Vigilancia.*

La computadora no ejecuta ninguna acción sobre los lazos de control. Recoge los valores de las diferentes variables, tanto de entrada como de salida del proceso, proporcionados por los actuadores y sensores. Calcula índices y valores de otras variables no medibles; los compara con los valores límite fijados, produciendo las alarmas correspondientes en caso de rebasarlos, y elabora informes de su evolución.

#### *Computadora de Control Supervisor Básico.*

Se aprovecha la computadora haciéndole intervenir en el lazo de control, aunque su intervención no consiste en cerrarlo sino sólo en fijar las referencias o consignas de los reguladores analógicos.

Como la computadora trata la información de muchos lazos, puede calcular la consigna de cada uno en función de la evolución de todas las variables de otros lazos relacionados, y de ordenes recibidas de un nivel superior.

### ***Computadora de Control Digital Directo.***

La computadora se hace cargo directo de la adquisición de datos, elaboración de las órdenes de control y de su envío a los actuadores. Ejecuta algoritmos y estrategias establecidas del bucle de control. La ley de control ya no se restringe al **Proporcionalmente Integral y Derivativo (PID)** clásico que lleva a cabo el controlador analógico, sino que puede llevar a cabo cualquier ley de control que se pueda programar, con decisiones lógicas y correcciones complejas. Hay que destacar dos tipos de componentes que aparecen en el bucle de control por exigencia de la incorporación del computador dentro del lazo: *Los convertidores y multiplexores*. Los primeros transforman las señales analógicas de los sensores en digitales para su manejo por el computador y las digitales de éste en analógicas para el mando de motores y válvulas. Los multiplexores, de entrada, permiten al computador repartir su potencia y su tiempo entre varios bucles de control, conectando secuencialmente el computador a los diferentes bucles a su cargo.

### ***Control Centralizado.***

Un control centralizado puede tener como componentes auxiliares (convertidores, multiplexores, consola, indicadores), además de un computador. Estos se encuentran situados no junto al proceso, sino en la sala central de control. En ella se concentra toda la instrumentación de control: controladores analógicos y/o digitales y computador supervisor, estando este núcleo de control comunicado individualmente con cada sensor y actuador situados en el campo. En este tipo de control el sistema de comunicaciones, que lleva todas las señales de la fábrica a la sala de control y devuelve a aquélla todas las señales de control, es vasto y costoso que exige mucha atención y experiencia para su diseño e instalación, para evitar los problemas de ruidos eléctricos o errores en la transmisión que pueden provocar el fallo total de la planta.

La solución pasa por la descentralización que se acomete de forma progresiva y que culmina con la configuración descentralizada, que presentaremos luego, al disponer de microcomputadoras instalados al pie del proceso, que se encargan de muchas de las tareas antes encomendadas al equipo central.

### ***Control Distribuido.***

Consiste en repartir los recursos de cálculo y control por toda la planta, aproximándolos lo más posible a los lugares en que se necesitan. Claro está que estos recursos deben estar en constante comunicación al lugar de mando general del proceso que estará encargado, también del almacenamiento general de la información, de la supervisión y coordinación general, así como la comunicación con los centros de control de otros procesos u otras secciones de la planta.

La red de comunicación entre los distintos recursos locales y la sala central de control es un elemento fundamental en este tipo de configuración. Las ventajas de una instalación de este tipo son innumerables: Su carácter modular permite utilizarlos tanto para la automatización del control de procesos, así como para el aumento de la flexibilidad en el diseño, la instalación y puesta en marcha de la misma planta. Permitiendo la protección de las comunicaciones y la posibilidad de adoptar medidas de redundancia y actuaciones en caso de falla y su reparación.

### ***Control Integral Jerarquizado.***

El control directo en un sistema distribuido y el control supervisor son partes del control por computadora que pueden implantarse en procesos industriales. El resultado final es la instalación de un sistema de control global de todas las actividades de un proceso industrial mediante una estructura de computadoras de todos los tipos (microcomputadoras, controladores lógico programables, controladores de regulación, minicomputadoras, computadoras personales y estaciones de trabajo inteligentes), todo conectado mediante canales de comunicación y organizados por niveles con una estructura jerarquizada; ver **figura 3-6**.

El nivel inferior de **control local**, tiene como objetivo el control por retroalimentación. La computadora tiene a su cargo adquirir datos de los sensores, acondicionarlos y/o corregirlos, comparar con valores límite, envío de los mensajes e informar oportunamente al nivel superior y determinar las señales a enviar a los actuadores, de acuerdo a el algoritmo de control seleccionado por el nivel superior y con la consigna fijada por éste.

El siguiente nivel, el de supervisión; comprueba los valores de las variables y sus tendencias, y genera las alarmas oportunas si se rabasan los límites establecidos, a la vez que se toman las acciones correctoras necesarias para la eliminación de tendencias anómalas. Además realiza la coordinación de varios controles directos de nivel inferior. El tercer nivel, de coordinación de área, tiene como finalidad el control y la organización de la producción de toda el área, mediante balances de material y de energía que se han de optimizar. Según los resultados de la optimización establece las condiciones de operación de cada proceso del área y las envía al correspondiente control supervisor.

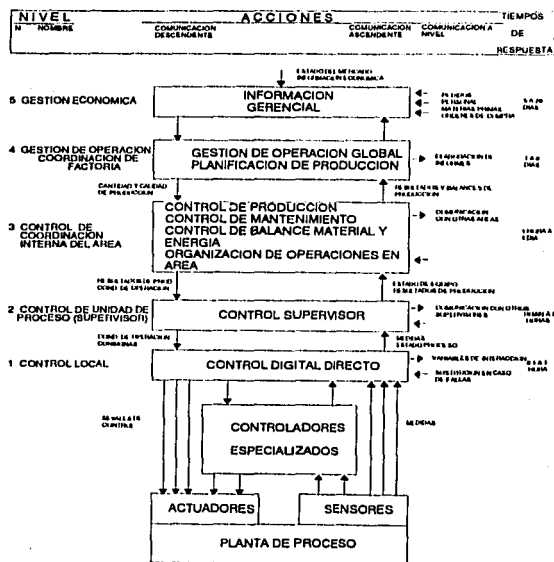


FIGURA (3-6). NIVELES Y AREAS DE UN SISTEMA DE CONTROL DE PROCESOS INTEGRAL JERARQUIZADO.

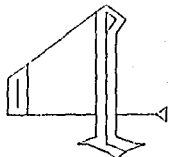
El cuarto nivel, es el de **gestión de fábrica**, que integra todas las áreas y planifica la producción de conjunto del proceso industrial, con la secuencia apropiada de las diferentes secciones y la colaboración entre todas ellas.

Finalmente el **nivel superior**, establece los planes de producción y la política de fabricación a seguir a partir de los pedidos, recursos, costos y el mercado existente.

Así pues, cada nivel se encarga de descomponer las ordenes que recibe del nivel superior y repartirlas a los dispositivos de nivel inferior que dependan de él, matizando dichas órdenes según la situación conocida por ese nivel y la información proveniente de los dispositivos del nivel inferior y de aquellos del mismo nivel con los que tenga comunicación directa.

A manera de conclusión, podemos decir que para llegar al control total de un proceso por medio de una computadora, es decir a la automatización total, se requiere hacer un análisis con operaciones de logística de proceso. El problema logístico consiste en la necesidad de dominar, de modo óptimo, varios pasos consecutivos de un proceso para los diferentes tipos de operación. La realización de estas funciones radica en el intercambio de datos de los niveles de control y de gestión, fortaleciendo el desempeño del sistema de control del propio proceso.

# CAPITULO



<< SOBRE LAS COSAS QUE NO SE CONOCEN  
SIEMPRE SE TIENE MEJOR OPINION. >>

WILHELM LEIBNIZ (1646-1716).  
FILOSOFO, FISICO Y MATEMATICO ALEMAN.

PLANIFICACION  
Y  
CONTROL.

---

#### 4.1 INTRODUCCION.

En este capítulo nos enfocamos al problema del control desde una perspectiva más amplia. En el campo activo, frecuentemente nos dedicamos más tiempo a formular los problemas de control que a resolverlos. Es por lo que hay que enfocar estos problemas a un aspecto mayormente generalizado y comprenderlos mejor.

La mayor parte de los problemas de control surgen al diseñar sistemas en ingeniería. Estos suelen ser de gran dimensión y borrosos; por dar algunos ejemplos de estos diseños, tenemos: plantas de energía, robots industriales, aviones, vehículos espaciales y sistemas biomédicos. Por su parte la teoría del control trata problemas bien definidos de pequeña escala. Un problema típico es diseñar una ley de control para un sistema dado, que se representa por medio de ecuaciones diferenciales o en diferencia.

Como habíamos dicho anteriormente, la perspectiva a la que nos referimos es respecto al proceso de diseño y un cierto sentido del papel de la teoría en el desarrollo del diseño. En primer lugar, un buen diseño de ingeniería debe satisfacer un gran número de especificaciones, y a menudo hay muchas soluciones igualmente buenas para un problema concreto de diseño. Un buen diseño suele ser un compromiso basado en concesiones razonables entre costo y prestaciones. Además, otro aspecto es que regularmente se llega al diseño por interacción entre el cliente y el vendedor. En esta interacción intervienen muchos factores subjetivos; tales como orgullo, tradición y ambición. La situación es particularmente confusa con respecto a las preferencias del cliente cuando la tecnología constantemente está cambiando.

Cosa muy importante entre el diseño del proceso y el de control, es que tradicionalmente el sistema de control es introducido en un proceso ya definido para simplificar o mejorar su funcionamiento. Sin embargo, cada vez resulta más claro que puede ganarse mucho si se consideran conjuntamente el diseño del proceso y el de control, ambos en un mismo contexto.

Llámesele diseño del proceso o diseño de control, es a partir de este punto en que desarrollaremos este capítulo, y es que hay que convencer al cliente de la conveniencia de cambiar los equipos analógicos por sistemas digitales, así también daremos un enfoque económico en el que podamos minimizar los costos de modernizar una planta de procesos o industria de manufactura, ya que las dos tienen como objetivo principal ofrecer un producto o servicio a los consumidores.

Los beneficios por medio de la computadora son muchos, y estos pueden ser de carácter tangible e intangible. Entre los de primer tipo están la mayor productividad, los menores costos salariales, menores desechos y reparaciones, menor consumo de energía y materias primas, mientras que en los segundos hay que considerar la más rápida introducción de productos, de mayor calidad, mejor control, mayor flexibilidad para adaptarse a la demanda del mercado y, lo que es muy importante, un flujo de información optimizado que mantenga comunicada a la planta.



## 4.2 MODERNIZACION.

Hay varios casos que pueden presentarse en la industria desde el punto de vista de la implantación del control de procesos. Un aspecto importante a considerar en la modernización es la normalización de las plantas antiguas, por lo que estudiaremos este punto posteriormente, ya que repercute directamente en la planta.

La modernización (*revamping*) de las plantas de proceso constituye un capítulo importante en el crecimiento global de las empresas. La necesidad de sustitución y modificación de los procesos industriales viene forzada por varios factores, entre los cuales figuran como los más importantes el crecimiento de los costos de energía, la demanda de productos con especificaciones cada vez más restrictivas y la producción barata y repetitiva de grandes cantidades de materias finales. Cada empresa debe satisfacer estas necesidades para mantenerse al día en el mercado y ser competitiva. Una planta que no se haya puesto al día pierde terreno rápidamente en cuanto a la producción repetitiva, barata y masiva de bienes que estén dentro de especificaciones, con lo cual, se arriesga a perder clientes, con las implicaciones de pérdida del mercado que ello conlleva.

Para que la modernización de la planta tenga éxito deben resolverse muchos problemas. Pero el más importante sin duda es que la operación de modernización debe realizarse dentro de un período de tiempo determinado (usualmente aprovechando los períodos de paro anuales de la fábrica).

La palabra modernización sugiere de inmediato, mejora, fabricación rentable, mejores condiciones de fabricación, etc., y predispone a su realización. Sin embargo, viene inmediatamente la pregunta: ¿Es justificable la modernización de la planta? La respuesta a esta pregunta no es clara. Oscilando entre la «obligación» de modernizarse y la «conveniencia», es útil plantearse inicialmente pequeños cambios en la planta que pueden convertirse en grandes mejoras. Por ejemplo, varios de estos puntos pueden ser:

- a) Instalación en un solo panel de control (computadora digital) que sustituya a los otros paneles locales. Esto permite a los operadores utilizar eficazmente su experiencia y mejorar el proceso aplicando técnicas avanzadas de control, y además mejorar su ambiente de trabajo, captando mejor el estado y los cambios que se presenten en el proceso, todo en una sola pantalla.
- b) Cambiar las características del proceso, modernizando la forma de fabricación del producto.
- c) Realizar cambios locales de algunos instrumentos de lazos críticos, con el fin de mejorar la velocidad de transmisión y la controlabilidad de estas variables.

El beneficio aportado por algunos de estos cambios es intangible. En general, el cambio de los instrumentos por otros actuales, sean electrónicos o pertenezcan al sistema de control directo, redundará en una mejor precisión, fiabilidad y flexibilidad, así como en una mejora de las comunicaciones y las capacidades gráficas de representación de la marcha del proceso en la pantalla de la computadora. Todo esto repercute, originándose una larga duración del equipo, menor gasto de energía en el control, etc. La magnitud de los beneficios conseguidos depende de varios factores, como la calidad de fabricación obtenida con la nueva instrumentación en comparación con la antigua y los cambios realizados en los esquemas de control.

Otro factor importante es la reducción aparente de personal, que a veces sirve para justificar la modernización de la planta. Es evidente que los instrumentos digitales eliminan las tareas repetitivas de la anotación periódica de las alarmas, de la redacción de informes, y del registro y almacenamiento de datos históricos, ya que las mismas son preprogramadas y ejecutadas automáticamente por dichos instrumentos. De este modo, el número de operadores de la sala de control se reduce considerablemente, lo que repercute en costos de operación más bajos. Sin embargo, lo lógico es utilizar al máximo las posibilidades de los sistemas modernos de control (que se traducen en rendimientos mayores que la relación 20 a 1 con respecto a los controles convencionales), y emplear en estas nuevas tareas a personal adicional, ya que se supone que la moderna tecnología se adquiere para realizar otros trabajos, aparte de las propias tareas repetitivas.

De este modo, la implantación del control moderno, en lugar de reducir el personal, lo que hará será conservar el nivel de empleo en la fábrica, pero reconvirtiendo al personal para realizar otras tareas de más alta calificación.

Las plantas que desean modernizarse empiezan por preguntarse. ¿Cómo pueden aumentar la productividad?, ¿cómo rebajar los costos de los productos que fabrican?, ¿cómo obtener más flexibilidad en la fabricación?, ¿cómo mejorar la seguridad de la planta y las condiciones de trabajo? y ¿cómo incorporar las nuevas tecnologías a su planta?. Si bien existen múltiples respuestas a estas preguntas, la respuesta más inmediata y más clara es realizar la modernización de la planta por vía de la instrumentación de proceso, es decir, modernizar la planta a través de la sustitución puntual o global, incluso de la transformación o sustitución total del tipo de instrumentación que posee la planta.

Esta transformación debe efectuarse con tres objetivos claros en mente:

- 1) Realizar la transformación en el mínimo de tiempo posible, pero sin imponer límites severos a la calidad del equipo que hay que adquirir. Por ejemplo, la fijación de un término de seis meses para la puesta en marcha de la planta o la parte de la planta que va a transformarse, impone de hecho la condición de descartar el control distribuido, ya que el suministrador dará probablemente un plazo de entrega entre 9 a 12 meses para entregar el control y a punto para el arranque. Debe fabricar los instrumentos y las unidades de control, el cable de comunicaciones, prefiar de acuerdo con el cliente las opciones y los valores de las acciones de control, realizar pruebas en su fábrica y en la planta, poner en marcha el control, etc.
- 2) Que el número de interrupciones o de alteraciones de la fabricación sea el mínimo posible. Ello obligará a instalar el nuevo equipo en una zona próxima al antiguo y en cierto modo a duplicar momentáneamente las tuberías y parte del equipo.
- 3) Gastar el mínimo dinero posible. La fijación de capital disponible para el proyecto es esencial para definir los cambios que pueden realizarse en la instalación. Aproximadamente, el costo de la instrumentación y de su instalación puede oscilar entre el 2 y el 10% del costo total de la modernización de la planta.

Dentro de este enfoque económico es importante que el tiempo de paro de la planta sea el mínimo posible. De lo contrario, el costo consiguiente puede llegar a ser tan alto como el costo del proyecto completo de modernización, e incluso superarlo. Para conseguir este objetivo es necesario minimizar los trabajos a realizar durante el paro de la planta.

Es importante definir los objetivos del proyecto de modernización durante la fase de planificación. Algunos de los objetivos referentes a la instrumentación de la planta son los siguientes:

- Normalización de los instrumentos, reduciendo el número de proveedores y modelos.
- Sustitución de los instrumentos que ya han dejado de fabricarse.
- Incorporación de los sistemas avanzados de control.
- Mejora de la seguridad de operación de la planta.

Deben tenerse en cuenta las restricciones que se presentarán en el proyecto en lo referente al tipo de equipo a modificar o a cambiar (tanques, compresores, intercambiadores de calor, hornos, bombas, tuberías e instrumentos).

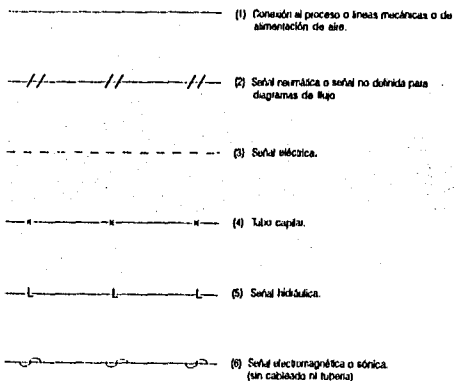
En los instrumentos, es importante considerar los siguientes puntos:

a) *La normalización de los instrumentos.*

Es posible que durante la vida de la planta se hayan ido instalando instrumentos de diferentes fabricantes en cada ampliación o modificación de parte del proceso. De este modo, la planta se ha ido dotando poco a poco de una serie de aparatos heterogéneos, lo que constituye un serio problema desde el punto de vista del mantenimiento de los aparatos, del entrenamiento de los instrumentistas, del aprovisionamiento de las piezas de recambio, y de la captación e integración de información necesaria para usos inventariales y de información que la dirección de la fábrica necesita (por ejemplo, el gasto de la energía y la valoración del costo y del beneficio del producto, y todo ello en tiempo real).

Así pues, cualquiera que sea el tamaño de la planta, conviene considerar dentro de la modernización la anulación de algunos instrumentos y su sustitución por unos nuevos de otros fabricantes, con el fin de reducir el número de los proveedores más importantes de los instrumentos a dos o tres, disminuyendo así el costo de los stocks de piezas de recambio y facilitando el entrenamiento de los operarios. Es también una buena práctica la evaluación periódica de los suministradores y el establecimiento de listas restringidas de proveedores. Esto permite disminuir el número de consultas y disponer de toda la información que sobre los instrumentos y su instalación facilita el fabricante así como contar con su total colaboración. Se recomienda también la confección de normas de instrumentos que faciliten la selección, la instalación y la operación de los aparatos. Ver figura (4-1).

Todas las líneas deben ser de trazo más fino que las líneas de las tuberías de proceso.



**FIGURA (4-1). NORMAS DE INSTRUMENTOS QUE FACILITAN LA SELECCION, INSTALACION Y OPERACION DE LOS APARATOS.**

b) *El examen del estado actual de los instrumentos de la planta.*

Debe comprobarse cuál es el estado de las tuberías, de los sistemas de alimentación de aire a los instrumentos, válvulas de control, el estado del cableado y el de los instrumentos en general.

Será necesario estudiar el emplazamiento de los nuevos instrumentos, sus soportes y los elementos necesarios para su funcionamiento. Convendrá disponer del espacio necesario para las nuevas instalaciones, sin dedicar a ello los espacios existentes del equipo que después va a eliminarse. Por ejemplo, la instalación de un nuevo intercambiador de calor en una estructura existente, requerirá ciertos trabajos de infraestructura (entre ellos, la instalación de los instrumentos), que será mejor realizar sin contar con el espacio que ocupa el intercambiador actual, que después quedará sustituido por el nuevo. De este modo será posible realizar los trabajos de instalación y de puesta en marcha del nuevo intercambiador, interfiriendo lo mínimo posible en la marcha general de la fábrica.

Lo mismo puede decirse del edificio que alberga la sala de control. Con el fin de unificar los diversos paneles de control repartidos por la planta, o bien convertir el panel general, es necesario que exista una sala central de control, en la que se instale una o más computadoras, las cuales tengan que trabajar en paralelo al funcionamiento de la fábrica, con la nueva línea de instrumentación seleccionada.

En caso de haber un tipo de control distribuido, deberá modificarse el cableado entre los instrumentos de campo y la sala central de control, sustituyendo los cables individuales por un cable de comunicaciones único (redundante).

Este análisis de los aparatos y de su instalación costará probablemente del orden de dos a seis veces el costo se supondría la compra aislada de los nuevos instrumentos de medición y control.

*c) El cambio o la modificación del Cv de las válvulas de control.*

Debe estudiarse la decisión más económica: o modificar el Cv de la válvula, o bien cambiarla.

La modificación del Cv consiste en desmontar la válvula y cambiar sus partes internas (obturador y asiento), lo cual no siempre es posible, dependiendo de las condiciones particulares de servicio a que haya estado sometida.

Entre ambas soluciones también puede decidirse conservar la válvula en el proceso y no efectuar el cambio. Al adoptar esta decisión, es necesario estudiar la influencia que tendrá en el control del proceso el trabajo de una válvula, según sea de pequeña capacidad o sobredimensionada, al haber aumentado o bien disminuido respectivamente la producción de la planta. En el primer caso, aumentará la pérdida de carga de la válvula, lo cual podrá o no ser soportado por la instalación (bomba, altura del líquido o presión del fluido en la tubería aguas arriba), mientras que en el segundo, la válvula trabajará en una zona de mala regulación (relación caudal-carrera no óptima) que sólo podrá admitirse en el caso de control de variables no críticas (en general nivel y presión).

*d) La incorporación de analizadores en línea.*

Esto sucede en el caso de que la modernización incluya una mejora en la calidad de los productos para mantenerlos dentro de especificaciones más rigurosas.

Si bien, tradicionalmente, los analizadores (especialmente los cromatógrafos) han sido considerados instrumentos de poca fiabilidad, con sistemas de muestreo que han introducido retardos, han interferido en la integridad de la muestra y se han obturado periódicamente, la nueva generación de analizadores es diferente, son instrumentos robustos, aptos para operación continua, no utilizan sistemas de muestreo, ya que instalados dentro del mismo proceso, disponen de autodiagnóstico, de autocalibración y son de construcción modular. Estos aparatos, aunque no son perfectos, han aumentado su utilización en la industria, lo cual sugiere que su uso por parte de los operadores de la planta presenta un balance positivo entre la seguridad de funcionamiento y la

productividad. Aproximadamente, los beneficios que pueden obtenerse instalando un control por analizador en una columna de destilación son del orden del 10% en ahorro de energía y ofrecen un aumento del 5% en la producción. Los sistemas de muestreo actuales utilizan filtros rotativos, programadores de automuestreo, electrodos con dispositivos automáticos de limpieza (ultrasónicos, hidrodinámicos, térmicos, mecánicos). Los analizadores típicos en la industria incluyen cromatógrafos, phmetros, analizadores de  $O_2$ , de infrarrojos, de humedad, espectrómetros de masa, etc.

e) *La valoración del paso del control clásico al control digital.*

Si del examen de esta posibilidad se decide adoptar el control por computadora, será el momento de estudiar la conveniencia de cambiar las configuraciones de control de la planta y adoptar sistemas de control avanzado, es decir, puestos en la decisión de realizar un cambio radical en la planta, por qué no considerar su total modernización, en particular si la planta es muy antigua y se ha decidido modernizarla totalmente sin límites de costo, valorándose positivamente el aumento global de rendimiento que tendrá la planta.

Aunque la inversión a realizar en la transformación de la planta es elevada, los resultados esperados, tanto desde el punto de vista del mantenimiento como desde el punto de vista de mejora de la fabricación, compensarán con creces los esfuerzos de todo tipo que se hayan dedicado a esta modernización. Por ejemplo, la sola aplicación de los controladores digitales, permitirá sustituir los armarios clásicos de relés por pequeños tableros y pantallas que ocuparán un menor espacio y serán mucho más versátiles, es decir, cuando se quiera se podrá cambiar la secuencia de operaciones de enclavamiento de los equipos, sin más que cambiar los programas correspondientes en las computadoras, operación que en el caso del accionamiento por relés era imposible o cara y engorrosa.

CON TIRAS NO REPE  
SALA DE LA BIBLIOTECA



### 4.3 PLANIFICACION.

Es importante realizar una planificación correcta de la modernización de la planta. En este sentido, son útiles los programas de computadoras que permiten planificar un gran número de actividades (tareas en que se divide el proyecto) y asignar los recursos necesarios (medios humanos, técnicos materiales y económicos) a cada actividad. Dichos programas permiten detectar el camino crítico (actividad o conjunto de actividades tales que, si es cambiada su duración, modificarán la fecha del final del proyecto), y controlar las desviaciones económicas entre los plazos planificados y los realizadores, lo que se denomina progreso del proyecto. De este modo se controlan correctamente los datos reales, pudiendo así actuar en el momento adecuado sobre cada uno de los aspectos del proyecto.

La planificación puede realizarse por nudos o uniones de dos o más actividades, y por CPM<sup>12</sup> o por precedencias, camino crítico o actividades predecesoras de cada actividad.

Los programas permiten nivelar automáticamente estos datos, y proporcionan el nombre de las actividades y las fechas que deben retrasarse para que en el proyecto existan los suficientes recursos humanos y materiales que permitan realizarlo. Notese, otra aplicación de la computadora, la de optimizar el proyecto en costos y materiales para que nuestro proyecto de modernización tenga el éxito esperado, y en un tiempo en que la planta no tenga que detenerse demasiado.

Como ejemplo, uno de estos programas es capaz de planificar 5,000 actividades, asignar 100 recursos a cada actividad, y programar en horas, días y meses. Estos programas son muy útiles, debido a la complicación e interrelación entre los múltiples factores que intervienen en el proyecto de modernización.

---

<sup>12</sup> CPM de las siglas en inglés (Critical Path Method): Método de la ruta crítica.

Durante la planificación conviene definir los siguientes elementos:

— *Objetivo de la modernización.* Es decir, hay que definir exactamente de forma clara y concreta lo que hay que realizar en el proyecto. Deben fijarse los límites de costo y de tiempo de que se dispondrá para la realización del proyecto y asignar los recursos técnicos, humanos y materiales necesarios.

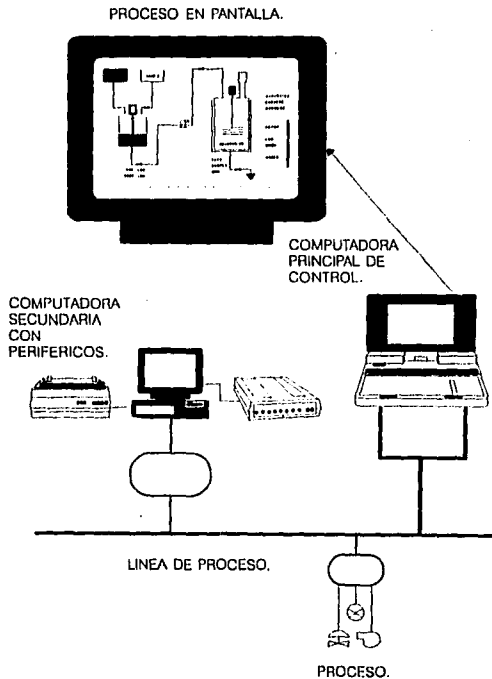
— *Equipo* que va a ser afectado por la modernización y el nuevo equipo necesario.

Uno de los objetivos de la modernización de la planta es reducir el tiempo de paro de la instalación, por el alto costo que representa, por lo que preparar la operación a fin de realizar lo más posible de trabajos sin afectar el ritmo normal de producción es más factible. Así se conseguirá agilizar el trabajo a realizar durante el paro de la planta.

Por otro lado, es evidente que para reducir al mínimo el tiempo de paro de la planta convendrá estudiar la posibilidad de instalar el equipo nuevo en paralelo con el existente, lo cual presenta un mayor costo de instalación y unas complicaciones adicionales.

Sin embargo, esta marcha en paralelo es muy conveniente cuando se ha tomado la decisión de cambiar los paneles de control por los de control digital, es decir la computadora. Sólo si es necesario, debe ampliarse la sala de control, para permitir la instalación de computadoras secundarias (ver **figura 4-2**), consolas, armarios y todo el material auxiliar, incluyendo los cables. Una vez terminada y probada esta nueva instalación en poco tiempo, y aprovechando un paro programado de la planta, se hace el cambio anulando la instrumentación antigua.

Será necesario estudiar la conveniencia de sustituir enteramente o de instalar en paralelo la instrumentación de campo. En este último caso, no es siempre conveniente, por ejemplo, instalar una válvula de control en paralelo con otra ya existente, debe descartarse ya que, aparte de los problemas de regulación que van a presentarse, siempre será más barato sustituir la válvula de la tubería existente.



**FIGURA (4-2). SALA DE CONTROL DE UN PROCESO POR MEDIO DE UN COMPUTADOR.**

— *Disponibilidad* del personal necesario para implementar el proyecto. Convendrá que venga definido su número, sus calificaciones y para los periodos de tiempo que va a ser necesario.

— *Beneficios y repercusiones* de la modernización.

La modernización, aparte de los beneficios que va a proporcionar, conducirá probablemente a requerimientos diferentes de personal sin afectar posiblemente a su número, por lo que será necesario *reconvertir* al personal existente. Convendrá preparar con tiempo esta reconversión, y convencer al personal afectado de la necesidad de esta preparación para que la modernización tenga un completo éxito. Será necesario establecer cursos de preparación y disponer de equipos reales o simuladores para que el personal de fabricación y de mantenimiento pueda practicar con el proceso en el manejo de las consolas del computador, o propiamente en la computadora, en el software, y en el seguimiento de averías. De este modo, no existirán problemas a la hora del cambio.

— *Sistemas de control*. Deben fijarse los instrumentos que deben sustituirse o modificarse. En este estudio deberá valorarse la decisión de cambiar todo el tipo de control, pasando de la instrumentación clásica convencional, y adoptar sistemas de control avanzado y técnicas de optimización. Por el interés requerido, analicemos más este punto.

Es un fenómeno general que al evolucionar tan rápidamente la técnica de instrumentación, las plantas de proceso se están quedando con frecuencia anticuadas. Puede afirmarse que los instrumentos neumáticos, con la excepción de las plantas de pequeño tamaño, han dejado de emplearse masivamente, y que la necesidad de obtener información procesable de la planta, conjuntamente con la necesidad de fabricar productos con especificaciones de fabricación cada vez más restrictivas, ha reducido su demanda en el mercado.

En plantas antiguas es posible que el fabricante de los instrumentos haya dejado de fabricar el modelo o la serie instalada en la fábrica. Sin embargo, esto no significa una especial gravedad, ya que los fabricantes garantizan el suministro de piezas de recambio para su sistema durante un tiempo de 5 a 10 años. De este modo, si bien en principio el problema que se presenta no es de urgente solución, obliga a pensar en la sustitución gradual de los instrumentos a medida que los mismos se vayan averiando. En la mayoría de los casos siempre será más barato utilizar instrumentos nuevos que reparar los antiguos (a no ser que dichos instrumentos estén instalados en lugares poco importantes de la planta), puesto que si el instrumento, por el lugar donde está instalado, da lugar a paros del proceso o a la fabricación bajo condiciones de servicio que incumplen las normas de calidad o las especificaciones del producto, el costo correspondiente será importante y superará el valor del nuevo instrumento.

Por otro lado, debe considerarse también aspectos como: el mayor costo y la mayor dedicación que el departamento de mantenimiento debe destinar al servicio del instrumento.

Estos aspectos vienen agravados por las condiciones de servicio, presión y de temperatura de la planta, etc.; éstas realizan una selección natural del instrumento, y sólo queda en funcionamiento aquél que, o bien es de excelente calidad, o bien fue escogido correctamente por la ingeniería que proyectó la planta, o el que fue instalado correctamente por la empresa instaladora. Así pues, el servicio de mantenimiento es el que se encarga inicialmente de la modernización de la planta, después de su puesta en marcha, detectando los instrumentos que no funcionan correctamente y reparándolos o sustituyéndolos por otros más idóneos. Es muy conveniente que la información de estos cambios llegue a todos los organismos, departamentos o ingenierías que proyectaron y realizaron el proyecto inicial de la fábrica. De este modo, los errores que se cometieron en la selección e instalación de los equipos e instrumentos serán tenidos en cuenta en el proyecto posterior a plantas similares. Esta continua información es la que permite que el arranque y la operación de las nuevas plantas que se van construyendo tenga lugar cada vez con mayor rapidez, seguridad y economía, y es el motor continuo que acelera el progreso técnico de las plantas de proceso en todo el mundo.

#### 4.3.1 INSTRUMENTOS DE CAMPO.

En esta área debemos de verificar aquellos instrumentos de medición o de control que han de cambiarse en la planta, estos son:

— Transmisores. Sustitución de los sensores o transmisores neumáticos por otros electrónicos o digitales considerando:

- 1) Los transmisores electrónicos convencionales tienen un mantenimiento similar a la de los instrumentos clásicos, es decir, en caso de avería el instrumento se separa en el taller de instrumentos de la fábrica, debiendo desmontarse del proceso, lo cual obliga generalmente a parar la parte de la planta donde esté situado el instrumento. Por ejemplo un transmisor de nivel de diafragma sólo puede desmontarse si el tanque está vacío o si está parcialmente lleno pero a una altura inferior a la brida de instalación del instrumento.
- 2) Los transmisores "inteligentes" presentan una mayor facilidad de mantenimiento y pueden calibrarse directamente en el campo, sin más que conectarles un comunicador que permite la lectura de la señal del proceso, la calibración del transmisor e incluso su reconfiguración, pulsando solo unas pocas teclas en el computador. De este modo desaparece la necesidad de desmontar el transmisor del proceso y llevarlo a su calibración, a no ser naturalmente, que el aparato presente una avería relacionada con el elemento primario de medición, en cuyo caso no hay otra solución que repararlo en el taller de instrumentos o sustituirlo.

— Válvulas de control.

En este caso se tiene que pasar de un control en el que se tienen actuadores neumáticos montados en las válvulas de control, por un control electrónico, es decir, habrá que sustituirlos por actuadores con posicionador electroneumático que permitan el accionamiento de la válvula por una señal electrónica de 4-20 mA c.d. En el caso de control digital se sustituirá el servomotor por otro con actuador digital. No siempre el fabricante de las válvulas de control ha previsto estos montajes en las válvulas que

fabricó unos años antes de la aparición del control digital en la industria, por lo que es posible que sea necesario sustituir enteramente la válvula neumática por otra de la última línea de fabricación del proveedor. Si la instalación es bastante antigua, es casi seguro que haya que sustituir enteramente la válvula de control.

— Instrumentos de panel.

Los instrumentos que han de ir comunicados a la computadora, son parte esencial para la medición de las variables del proceso, por lo que en este rubro hay nuevas tecnologías implementadas.

Los instrumentos digitales están preparados para su conexión a la computadora, por lo que son muy convenientes, ya que los criterios de modernización de la planta requieren y tienen la necesidad de estar captando información de toda la planta para realizar balances de consumo de materias primas, energía, etc.

Habrà que estudiar la conveniencia del empleo del control avanzado, entendiendo que este tipo de control se aparta del clásico PID y de los controles en cascada y de relación. Por ejemplo, pertenecen al control avanzado de procesos, la compensación dinámica de los retardos del proceso (hay transmisores con este tipo de compensación que anticipan la respuesta ante cambios en la variable, por lo que la unidad controladora o computador recibe al instante los valores dinámicos de la variable, y el control pasa a ser mucho más rápido), las técnicas de control de multivariables, que acoplan o desacoplan las interacciones entre lazos de control, la ganancia relativa, y en general los cálculos especiales que relacionen entre sí las variables de proceso. También puede examinarse la aplicación de la optimización para maximizar el rendimiento de la planta (se combinan un modelo del proceso y la función de optimización deseada).

#### 4.3.2 MODERNIZACION TOTAL.

A medida que transcurre la vida de una planta, esta va requiriendo de que se cambie a las nuevas tecnologías que van surgiendo, o de lo contrario se caería en un estancamiento que repercutiría en el atraso de la fábrica. Veamos pues en que serie de errores de medición se incurre cuando se cuenta con instrumentos todavía antiguos; además, no siempre es el instrumento el que tiene un mal funcionamiento, sino que a veces el causante de los problemas es su mala instalación o una lectura mal hecha por el usuario.

Así ocurre en los siguientes casos:

- a) Un medidor de caudal magnético que haya sido instalado en posición horizontal dará problemas de lectura, es decir, la lectura será falsa, no correspondiendo a la realidad si el líquido que pasa a través contiene gases en disolución que en cualquier momento pueden desprender burbujas, las cuales pueden solaparse con la medición propia del caudal del fluido.
- b) La medición de nivel en un tanque, realizada con el propósito de valorar cuantitativamente el contenido en peso del fluido, no dará resultados correctos si el fluido varía de densidad, a no ser que se compensen las lecturas con relación a la densidad, o se midan la presión y la temperatura.
- c) La medición del nivel en un tanque con espuma en su superficie y utilizando un aparato de ultrasonidos ocasionará problemas, ya que el instrumento no discriminará entre la espuma y el nivel real en el tanque. Igual ocurrirá en un medidor de nivel de tipo capacitivo si el líquido se adhiere al electrodo de capacidad fijado verticalmente en el tanque el sistema medirá una capacidad errónea y dará una lectura falsa.
- d) Un transmisor neumático, con una distancia excesiva al receptor y midiendo una variable que cambie rápidamente de valor, dará lugar a una lectura amortiguada del valor de la variable en el controlador y, si bien a veces esto es deseable, siempre se tendrá un error dinámico en la medición.



- e) En ocasiones el intervalo excesivo entre calibraciones de un instrumento dará lugar a una degradación progresiva de la lectura, con lo cual, el operador de la planta pensará, cada vez que el instrumento se calibre, que el departamento de mantenimiento ha cambiado el funcionamiento del aparato, ya que él estaba acostumbrado a trabajar con el instrumento descalibrado.

Y podríamos seguir citando muchos otros ejemplos ilustrativos de las repercusiones que tienen en el funcionamiento de la planta la mala instalación o la incorrecta calibración de los aparatos. Llevadas las cosas al límite, llega un momento en el que nadie tiene confianza en lo que marcan los instrumentos.

En lo que respecta al control por computadora, sus aplicaciones son inagotables, permitiendo hacer cálculos rápidamente en el llamado "tiempo real", es decir, en un tiempo tal que la información está disponible con el tiempo suficiente como para permitir que se emprenda una acción útil. Es más, repetirá tareas infatigablemente durante el tiempo que se le requiera: si se le programa adecuadamente, no generará errores debidos a la fatiga o a la imprecisión personal. Estas características son obviamente de las más valiosas para el control de la planta. El advenimiento de las mini y microcomputadoras hace una realidad el acceso de *tiempo real* a programas y archivos y su rapidez, combinada con terminales repartidas por toda la planta, transformará eficazmente el control de su planta de procesos.

La modernización a gran escala de toda la planta no es fácil, pero puede asimilarse realmente un sólo estudio como planta completa, considerando lógicamente que muchos de los equipos se conservarán, y que el cambio radical se experimentará en los instrumentos de medición y control.

De modo que ahora el cambio está en sus manos, quedarse en lo obsoleto o cambiar a un sistema de control que sin duda contribuirá al desarrollo de la industria con todas las ventajas que ya hemos mencionado a lo largo de la investigación presente.

#### 4.4 LA FUNCION DE CONTROL.

Para lograr que una máquina funciones regularmente, debe existir un proceso casi continuo de ajuste que adapte la cantidad de trabajo realizada por el vapor en el cilindro a la cantidad de trabajo externo exigida a la máquina. Aún en los casos en que la demanda de trabajo sea sensiblemente uniforme, las fluctuaciones de presión en la caldera seguirán haciendo necesaria la regulación.<sup>13</sup> Este comentario relativo a máquinas de vapor se aplica con igual validez a las organizaciones industriales, y sustituyendo por cierto las palabras "máquina", "vapor", "cilindro", y "presión en la caldera" por las palabras "unidad operativa", "obrerros", "talleres" y "recursos", dicho texto podría servir como párrafo inicial de un tratado sobre Administración Industrial.

Esta necesidad de regulación se sintió desde que empezó el desarrollo de la máquina de vapor, y se hizo evidente que el control tenía que provenir *de la máquina misma*. Una máquina de vapor a la que se le permitiera funcionar sin ninguna restricción, en el mejor de los casos saltaría en pedazos, y si bien el control podía lograrse a veces en forma externa, tal solución era costosa, inconveniente y en extremo difícil. El control requerido, con todas sus sutilezas, sólo podía lograrse satisfactoriamente incorporando a la máquina un dispositivo que, por el comportamiento de la máquina misma, ejerciera control sobre ésta. Hacia 1788, Watt había fabricado una máquina en serie que contenía tal dispositivo: este dispositivo recibió el nombre de regulador, y durante su funcionamiento exhibe la mayoría de las características que deben tener un sistema satisfactorio de control en una organización industrial. La idea importante en relación con el regulador es que el control es inherente al diseño de la máquina, y Maxwell por ejemplo, al escribir "sobre reguladores" en 1868, define un regulador como "... una parte de una máquina que mantiene casi uniforme la velocidad de ésta, a pesar de las variaciones que ocurran en la potencia motriz o en la resistencia".

Actualmente las industrias de nuestros días tienen la necesidad de los reguladores como la tuvieron las máquinas en el comienzo de la Revolución Industrial. El tamaño, las capacidades y las complejidades de las compañías modernas aun de las más pequeñas,

---

<sup>13</sup> J.A. Ewing, *Steam Engines en la Enciclopedia Británica*, 1911

requieren que el control de las actividades de la organización se origine dentro de ésta. Al disminuir las pérdidas por la ineficiencia, lo más probable es que una organización "salte en pedazos" a menos que se le controle, y el ejercicio de este control ya no puede provenir del hombre que está arriba, puesto que las organizaciones industriales son ahora tan complejas, y están sujetas a perturbaciones externas tan grandes, que ninguna persona puede esperar ejercer el control detallado y sofisticado que se necesita.

Lo anterior no es para insinuar que no se pueda dirigir —es decir, determinar el uso de— una organización. Lejos está de ello: el concepto importante aquí es que al establecer una organización, para hacer que funcione regularmente es necesario diseñar los sistemas de control *como parte de la organización*, y que el control que se ejerza dentro de los límites establecidos por la dirección provenga del funcionamiento de la organización misma.

#### *Las características esenciales del control.*

¿Qué ha sido, en esencia, lo que se ha tenido que hacer para que la actividad de controlar esté de acuerdo con los requerimientos que necesitamos? En primer lugar hay que examinar detalladamente el sistema de proceso completo y el nivel de actividad deseado; por lo que se ha preparado un **PLAN** apropiado. En el curso de este examen puede haberse tenido que modificar el sistema propuesto inicialmente, de manera que al delinear el plan es necesario hacer un análisis completo de todo el sistema y construir un modelo de él. Si este modelo revelara que no es posible elegir entre alternativas, entonces no se podrá ejercer control alguno.

Habiéndose preparado el plan, es necesario integrarlo al sistema, es decir, tiene que **DIVULGARSE**. Ya en operación, la actividad tiene que **MEDIRSE**, por ejemplo una presión, temperatura, densidad, etc. Estas medidas se **COMPARAN** después con el plan inicial, y finalmente tiene que retroalimentarse un **REPORTE** a la porción activa del sistema en términos que sean inteligibles. Luego se toma **ACCION CORRECTIVA** para restaurar el funcionamiento que se requería inicialmente.

Es común o en la mayor parte de los sistemas de control industrial, se tengan las mismas características esenciales:

1. Plan
2. Divulgación
3. Medición
4. Comparación
5. Reporte
6. Corrección

y éstas parecen ser inherentes a cualquier sistema o mecanismo de control. Por supuesto, un departamento de control industrial puede tener asignadas otras labores además de las anteriores, pero esto es en gran parte un asunto de conveniencia organizacional. De modo semejante, las tareas de *planeación* (excepto en el sentido más mecánico) y de *corrección* no son efectuadas a menudo por el departamento de control mismo, sino que se les considera como parte de las obligaciones del personal administrativo/gerencial. El efecto de estas variaciones es ocasionar que los departamentos de control sean sólo parte del sistema completo de control de la organización.

***Condiciones necesarias para la existencia de un sistema de control.***

Se han señalado en un importante trabajo sobre control por Tocher<sup>14</sup>, que son cuatro las condiciones necesarias para la existencia de una función de control:

1. Debe haber un conjunto específico de ocasiones en las que sea posible elegir una acción.
2. En cada ocasión debe haber un conjunto específico de acciones a elegir.
3. Debe existir un modelo que pueda predecir la historia futura del sistema bajo cada elección posible.

---

<sup>14</sup> Tocher, *Operational Research Quarterly*, Vol. 21, No. 2.

4. Debe haber un criterio y objetivo en el que se base la elección, comparando el comportamiento previsible del sistema con el objetivo.

Teóricamente sólo deben tomarse decisiones si se explotan las acciones posibles y sus resultados, y entonces se selecciona la óptima. En la práctica a menudo no es posible hacer esto, ya sea porque el número de alternativas sea demasiado grande o porque algunos factores sean difíciles de determinar. Por tanto, puede tener que aceptarse una decisión que sea probablemente la subóptima.

*Condiciones para la operación satisfactoria de un sistema de control industrial.*

Para que un sistema de control industrial funcione en la forma ideada por su diseñador, es necesario que se dirija la atención hacia ciertas características. Entre éstas pueden mencionarse las siguientes:

1. El propósito de la actividad —sus objetivos— debe estar bien definido. Sin tal definición, la eficacia será aleatoria.
2. El control sólo es posible si puede ejercerse la *elección*. Mientras mayor sea la elección, más será el control posible, pero el exceso de elección puede ser costoso, por lo que puede resultar conveniente restringirla fijando algunos parámetros o fronteras. Por ejemplo, al programar, el número de programas posibles es tan grande que es vital tener cierta restricción.
3. Las mediciones deben tener una precisión apropiada.
4. La información reunida necesita ser pertinente. Si se alimenta con información innecesaria un sistema se pueden encubrir los efectos que debe detectar por diseño dicho sistema, al igual que el ruido puede impedir que el oído distinga una nota musical de otra.

5. Las comparaciones deben hacerse a intervalos que permitan tomar una acción útil. En algunos casos es útil usar el régimen de cambio de una característica como promotor de acciones.
6. Deben retroalimentarse reportes en una forma aceptable al departamento de control. Por supuesto, se debe tener cuidado aquí, ya que el procesamiento de la información puede ocasionar atrasos y/o distorsiones en la línea de retroalimentación.
7. La información recolectada por el sistema debe ser correcta, o por lo menos congruente. La falta de observancia de este requisito en particular ha ocasionado a menudo el descrédito inapropiado de un sistema de control. Los sistemas de control no *generan* información; la *procesan*. Los errores consecuentes no surgen por el sistema de control, aunque con frecuencia se dice injustamente que éste es el que falla. Debe reconocerse que la manera de recopilar información puede, por mal diseño, provocar una medición o un registro incorrecto de los datos.

Cuando una planta tiene trabajando varios sistemas de control, pueden reducirse los efectos de inexactitud en cualquiera de ellos por la operación de los otros: el entrelazamiento de los diversos sistemas hace que entre todos actúen como una red en la que un hilo roto no demerita su utilidad. Además, si las inexactitudes son consistentes podrán compensarse, y puede ser más económico y simple diseñar un sistema inexacto estable que uno que sea sumamente exacto.

8. El número de etapas por las que deba pasar la información al ser retroalimentada desde los puntos de origen hasta la porción activa del sistema debe mantenerse al mínimo posible. Cada etapa no sólo causa atrasos en forma inevitable, sino también genera distorsiones cuya corrección puede ser difícil, costosa y tardada.

1. Debe definirse el propósito.
2. Debe haber posibilidad de elección de acción.
3. La información debe ser adecuadamente precisa.
4. La información debe ser pertinente.
5. La respuesta del sistema debe ser lo suficientemente rápida para permitir que se tome acción útil.
6. La información debe presentarse en las unidades correctas.
7. Los reportes deben ser exactos, o de inexactitud consistente.
8. El número de etapas del proceso de retroalimentación debe ser el menor posible.

*Requisitos para la implantación de un sistema de control.*

*Ventajas de un sistema de control diseñado explícitamente.*

La discusión anterior sugiere que es inevitablemente tener por lo menos un sistema de control en el funcionamiento de una organización. Por lo que se puede diseñar un sistema de control explícitamente como parte integral de la situación, el cual tenga ventajas muy reales. Casi no difieren mucho de las anteriores, ya que al final se trata de sistemas de control, en los que los principios y objetivos son muy parecidos. Veamos pues, que las ventajas comprenden:

1. La formulación del plan mismo, si se lleva a cabo con la debida responsabilidad, requerirá la consideración detallada del sistema completo. Nos tendremos que formular las mismas preguntas anteriores, de el propósito y objetivos del control. En el curso de este planteamiento, las tareas y recursos pueden requerir modificación. Así, el plan mismo es una herramienta organizacional de valor considerable y único.
2. Una vez establecido, el plan proporcionará un conocimiento adelantado del rendimiento alcanzable del sistema. Esto sucede obviamente con un presupuesto, pero puede parecer que no sucede lo mismo con otros sistemas de control, si bien en todos los casos se aplica con igual fuerza. Por ejemplo, si una máquina requiere en su operación que se mantenga en una dimensión a  $\pm 0.01$  mm, estará implícito en él sólo la mención de que sea deseable esa exactitud, sino también que es obtenible económicamente.

3. Obteniendo información del sistema durante su funcionamiento, es posible corregir su comportamiento y modificar los efectos antes de cualquier distorsión. En consecuencia, el control debe considerarse constructivo, no restrictivo.
4. Al señalar sólo las desviaciones habidas respecto al plan, el departamento de control se libera de la necesidad de examinar todos los datos, y puede examinar sólo aquellos que requieran acción.

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ol style="list-style-type: none"><li>1. El sistema es una herramienta organizacional.</li><li>2. Se obtiene un conocimiento adelantado del rendimiento alcanzable.</li><li>3. Puede tomarse acción correctiva mientras dicha acción sea útil.</li><li>4. Sólo se examinan las áreas problemáticas.</li></ol> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

*Ventajas de un sistema de control diseñado explícitamente.*



#### 4.5 DESARROLLO ECONOMICO.

Hemos mencionado a lo largo de este capítulo los problemas sobre lo que implica el costo de controlar una planta, la inversión en los equipos de medición y control, pero no es tan fácil desarrollar un plan en el que se tenga la plena seguridad de que será el más óptimo y seguro.

Más de una compañía ha dado al traste consigo misma a fuerza de "controlarse". Por eso hay que tener en cuenta que uno de los principios más importantes es el de saber cuanto control es necesario. Un defecto de control puede llevar a la ruina a la planta por gastos innecesarios de instauración de procedimientos, por tiempos excesivos para la entrega, gastos excesivos de horas extras, y otros muchos costos innecesarios. Hay que contrarrestar lo que representan esos gastos frente al costo de un control más estricto que podría conducir a contratar más gente y comprar más equipo. Hay que tener por tanto, la capacidad para nosotros como ingenieros de tomar decisiones, y una de las más importantes es la de saber exactamente cuánto control es deseable.

Al igual que en los sistemas de control, al hacer un plan presupuestario tenemos que enfocarnos a las mismas características esenciales del control, las cuales son:

1. *Planeación.* Se tiene que preparar un presupuesto que tome en consideración el propósito, las capacidades, las limitaciones y los niveles de actividad de todos los departamentos en los que se tiene relación con el de sistemas de control. Este presupuesto es el que forma el modelo de control y el que define los objetivos.
2. *Divulgación.* Una vez aceptado, el presupuesto se tiene que distribuir entre todos los interesados. Un presupuesto bien cimentado que nunca se ponga a disposición de aquellos a los que se aplica, es de valor limitado y sin embargo es bastante común.
3. *Medición.* Las mediciones de la actividad tienen que obtenerse mediante hojas de tiempo, tarjetas de asistencia o cualquier otro medio apropiado.

4. *Comparación.* Las mediciones obtenidas tienen que compararse con los niveles que se hayan acordado en el presupuesto.

5. *Reportamiento.* Los supervisores apropiados tienen que retroalimentarse con informes que registren las desviaciones respecto al presupuesto.

6. *Acción correctiva.* Al recibir un reporte de que los resultados no están de acuerdo con el plan, el supervisor indicado necesita tomar una acción correctiva ya sea reduciendo los gastos o iniciando un nuevo plan.

Hemos llevado a cabo con las características mencionadas una **Planeación**, en la cual se han establecido los objetivos y políticas que obviamente forman un plan presupuestario para el análisis de implementación de un sistema de control. En seguida veremos cuales son los pronósticos que podemos tener a corto y largo plazo.

#### *El pronóstico a largo plazo.*

La implementación de un sistema de control traerá consigo beneficios directamente sobre la línea de producción, por lo que se requiere hacer un estudio en el que se analicen los posibles cambios de tecnología.

Los detalles de la preparación de un pronóstico a largo plazo es demasiado largo, por lo que se enuncian solamente las características principales con las que tiene relación. El departamento de control por sí sólo no podría hacer un estudio de este tipo, por lo que se auxilia de consejeros económicos, estadísticos, políticos y técnicos, y se basa en información sobre aspectos tales como:

1. Niveles de producción industrial, tanto nacionales como internacionales.
2. Gasto público.
3. Disponibilidad de mano de obra.
4. Cambios posibles en la estructura de precios.
5. Variaciones en los niveles de vida.
6. Competencia tanto nacional como internacional.

7. Nuevos productos posibles.
8. Mercados potenciales.
9. Cambios tecnológicos.
10. Recursos de la planta.
11. Historial de la planta.
12. Objetivos, políticas y planes de la fábrica a largo plazo.

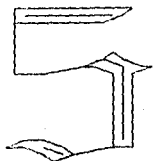
El pronóstico a largo plazo se lleva a cabo para un período de entre cinco a diez años, en el que se prevé un crecimiento considerable y un fuerte gasto de capital. Además de que la tecnología es la que va cambiando constantemente, y un factor muy importante que actualmente es un hilo apunto de romperse para muchas industrias la "Economía", en la cual se torna una diferente incertidumbre para cada país en especial.

#### *El pronóstico a corto plazo.*

El estudio se hace desde una perspectiva más amplia, ya que se tomarán acciones que repercutan lo más rápidamente sobre la producción, ya sea elevarla o de una calidad mejorada. Claro que en el pronóstico a largo plazo se sigue el mismo objetivo, sólo que es el tiempo el que los diferencia. El sistema de control se tendrá que ir definiendo en períodos más cortos de manera que el pronóstico sea lo que se tiene planeado.

Por último, es importante recalcar que durante la preparación y finalización de los pronósticos, habrá sido necesario examinar las distintas restricciones a las que se enfrenta la organización para asegurarse de que el pronóstico se ajuste a ellas. Al hacer esto se habrán reunido todos los datos necesarios para preparar un presupuesto, aunque posiblemente no en la forma apropiada en que lo haría el control presupuestal, pero ya con un buen plan definido. Cuando estos datos desorganizados se preparan por las áreas de responsabilidad, se habrá creado un *presupuesto* y se habrán establecido las bases para el sistema de control, en este caso el diseñado por computadora.

# CAPITULO



<< LA TEORIA ES ASESINADA TARDE O  
TEMPRANO POR LA EXPERIENCIA. >>

ALBERT EINSTEIN (1879-1955),  
FISICO ALEMAN, NATURALIZADO  
NORTEAMERICANO.

ADIU,  
UN SISTEMA  
SIMULADOR.

---

## 5.1 INTRODUCCION.

En todos los aspectos de la vida cotidiana, siempre se está buscando proporcionar al ser humano mejores condiciones. En el hogar estas condiciones se establecen en términos de salud, alimentación, comodidad, tranquilidad, esparcimiento, etc. En el trabajo y en la industria, para disminuir la fatiga y aumentar el rendimiento de los trabajadores, se busca la manera de proporcionar las mejores condiciones ambientales, ventilación, iluminación, posición de operación, las relaciones interpersonales, etc., y así podríamos mencionar muchos factores en donde intervienen de manera preponderante la calidad de vida de las personas. De tal suerte que no cabe la menor duda que cada día que pasa se le da más valor a los fenómenos humanos. El desarrollo de las ciencias computacionales no escapa a estas importantes consideraciones y actualmente estamos viendo grandes esfuerzos de los investigadores del área por acercar la computadora al hombre con sistemas de interacción cada vez más amigables, en donde el ser humano no se fatigue o tenga que desarrollar demasiadas habilidades para interactuar con una máquina de estas.

En los sistemas computarizados modernos se ha estimado que la interfaz hombre-máquina es un aspecto muy importante, puesto que representa la cara que el sistema da al usuario, y de aquí la aceptación o rechazo en su conjunto por los usuarios potenciales. Dada su importancia, el desarrollo de estos sistemas muchas veces resultan más costosos que el mismo sistema de la aplicación, por lo que el trabajo de investigadores y desarrolladores en esta línea se orientan hacia dos corrientes, las Librerías de Clases para el desarrollo de Interfases Gráficas de usuario, y los Constructores Interactivos de Interfases Gráficas de Usuario. Ambas tendencias permiten la construcción de sistemas interactivos hombre-máquina reduciendo considerablemente los tiempos de desarrollo y por consiguiente los costos de éstos.

El sistema está basado en la implementación y uso de herramientas de prototipificación rápida, cuya idea fundamental es proporcionar al usuario facilidades interactivas de programación visual, con aplicación a la supervisión o monitoreo de variables de procesos industriales; pero a la par reducir los esfuerzos de programación en lenguajes tradicionales.

La idea original del desarrollo de este sistema, surgió del proyecto de nuevas tecnologías para los **Sistemas de Adquisición de Datos y Registro de Eventos (SADRE's)**, del departamento de automatización de procesos del **Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE)**, en el que se planteó la implementación de sistemas que incluyeran conceptos tecnológicos modernos novedosos tales como el desarrollo de interfaces gráficas, programación orientada a objetos, herramientas de desarrollo de prototipos, programación visual, etc. Sin embargo durante las fases de análisis y diseño, se vio que éste podría ser aplicado no solo al SADRE, sino también en otros ambientes de procesos industriales similares, siempre y cuando el sistema diera facilidades de configuración visual y permitiera con cierta facilidad la incorporación de funciones específicas de la aplicación, tales como nuevas representaciones gráficas de monitoreo de variables.

A lo largo de este capítulo veremos el tipo de arquitectura que tiene el sistema de **Ambiente de Desarrollo de Interfases de Usuario (ADIU)**, así como dar algunos ejemplos de como simular el monitoreo de algunas variables que intervienen en los procesos industriales, a la vez también se proporcionará un pequeño manual de comandos y funciones de teclas.

## 5.2 EL SADRE COMO ANTECEDENTE DEL ADIU.

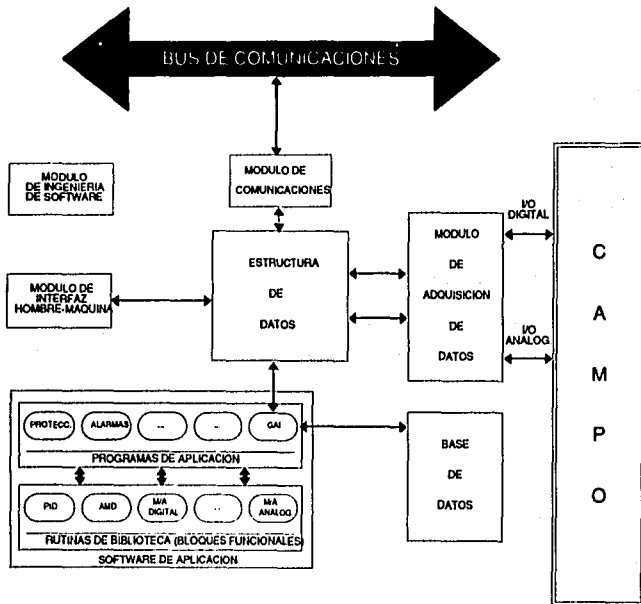
Un sistema de Adquisición de datos se entiende como un sistema de cómputo —hardware y software— orientado a la adquisición, procesamiento y despliegue de datos en tiempo real. El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), a través de su departamento de simulación ha desarrollado sistemas de este tipo orientados a la operación de plantas de generación de energía eléctrica, con el propósito de aumentar la eficiencia y seguridad de las centrales eléctricas del país. La experiencia del departamento de simulación incluye desarrollos como los Sistemas de Adquisición de Datos y Registro de Eventos (SADRE's) de Tula, Hgo. y Manzanillo, Col. así como del Sistema de Registro y Análisis de Transitorios (SIRAT) para la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde (CNLV).

El "SADRE" está diseñado para la supervisión y documentación de la operación de centrales termoeléctricas normalizadas (160-350 MW), a través de despliegues en pantallas, reportes en impresoras y de gráficas en registradores; la información la recibe por medio de dispositivos de medición. La función del sistema es la de procesamiento de grandes volúmenes de información y presentarla de manera simple al operador para tenerlo bien informado del estado que guarda la planta.

Las tareas a las que está orientado el "SADRE" son las siguientes:

- o Presentación detallada de condiciones anormales de la planta.
- o Elaboración de cálculos de parámetros de la planta.
- o Almacenamiento y presentación de los datos necesarios para analizar disturbios o disparos de la planta.
- o Documentación de la operación de la planta.

En la **figura 5-1** se ilustra la arquitectura convencional de un SADRE, en la que se pueden distinguir cinco elementos que constantemente interactúan entre sí para obtener un sistema seguro, confiable y amigable. Estos elementos son:



**FIGURA (5-1). ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS Y REGISTRO DE EVENTOS (SADRE).**



- **"ADQUISICIÓN DE DATOS"**: Las adquisiciones de datos es el módulo de un SADRE encargado de adquirir las señales del medio externo, procesarlas y convertirlas en señales digitales y acondicionarlas para su empleo por el SADRE. Debe detectar eventos externos como disparos de bombas, cierre de interruptores etc. y comunicarlos a los módulos superiores de la computadora.
- **"COMUNICACIONES"**: Contempla el protocolo de comunicaciones y establece las relaciones entre los diferentes elementos del equipo que configuran al SADRE. Es de suma importancia puesto que es la parte que determina el grado de distribución que el sistema presentará como un todo.
- **"SOFTWARE DE APLICACION"**: Engloba los aspectos computacionales que se encargan de la manipulación de la información; tales como programas de diagnóstico de alarmas y protecciones, manejadores de la base de datos, acondicionamiento de señales, registro de eventos, historia de variables, control de periféricos etc. Estos son ejemplos de programas de campo tendientes a controlar el proceso y que son escritos por el usuario.
- **"INTERFAZ HOMBRE-MAQUINA"**: Es el elemento del SADRE que permite al operador obtener el máximo de provecho del sistema, de manera amigable y eficiente. Esta es la cara que el sistema presenta al usuario y por lo tanto es un elemento de suma importancia dentro del desarrollo de un SADRE.
- **"INGENIERIA DE SOFTWARE"**: Debe de estar presente en todos los aspectos del desarrollo intrínseco y de supervisión de cada módulo de un SADRE, para el aseguramiento de la calidad total del sistema. Involucra el establecimiento de las interacciones entre los módulos, debiendo proporcionar apoyo a cada uno de ellos en cuanto a su mantenimiento, documentación, verificación y validación de los subsistemas.

El departamento de automatización de procesos del propio IIE tiene en proyecto el desarrollo de nuevas tecnologías para los SADRE's. El proyecto propone contemplar en forma integral todos los aspectos que componen un SADRE; dividido en cinco módulos; adquisición de datos, comunicaciones, software de aplicación, interfaz hombre-máquina e ingeniería de software; de tal manera que se avance en forma completa y en armonía en cada uno de ellos, que por un lado aprovechen la experiencia adquirida y por otro que asimilen y apliquen nuevas tecnologías.

A manera de resumen, se tomaron en cuenta las siguientes características para la elaboración del diseño de la interfaz con el usuario:

- Aspectos psicológicos.
- Principios ergonómicos.
- Las características de las tareas que deben realizar los operadores.
- Las características de los operadores.
- El contexto del trabajo.
- Las informaciones que necesitan los operadores.
- Que los mecanismos de acceso a la información sean sencillos y fáciles de usar.
- Que no obliguen al operador a memorizar códigos informáticos o búsquedas tediosas de teclas.
- El tiempo de obtención de la información.
- La distribución de presentación de la información en varias zonas fijas y en varias páginas de acuerdo a una progresión natural de desarrollo de las tareas o de acuerdo con la estructura jerárquica material o funcional del proceso.
- La frecuencia de repaso y duración antes de la actualización del despliegue de la información.
- Los diferentes puestos de las personas que mantienen diálogo con la máquina.
- La identificación de diálogos de acuerdo a la categoría de los usuarios del SADRE.

### 5.3 PRINCIPIOS DE DISEÑO DE INTERFASES DE USUARIO.

El objetivo general de este capítulo es el desarrollo de un sistema interactivo, que permita la construcción visual de pantallas gráficas para desplegar información de variables y/o parámetros de procesos industriales, que puedan ser incorporadas sin problemas de acoplamiento a sistemas de control de procesos como el SADRE. De tal manera que para la misma aplicación puedan construirse varias presentaciones (pantallas) de manera consistente o que de soporte para la construcción de interfaces en varias aplicaciones y que opere en computadoras personales.

De manera más específica para el desarrollo de este sistema consideremos los siguientes objetivos particulares para su realización:

- Proporcionar un medio para configurar en línea la forma de las pantallas gráficas. Tales como la disposición en pantalla, controlando la densidad de información presentada, el uso de colores, asociación de variables a representaciones gráficas y asociación de representaciones gráficas a porciones de pantalla denominadas ventanas.
- La implementación de algoritmos para la edición de ventanas, edición gráfica, asociación de variables con el sistema de despliegues, del controlador de diálogo y de la representación interna de las estructuras de datos.
- Disminuir los costos de programación y mantenimiento de los sistemas hombre-máquina para sistemas de supervisión o monitoreo de variables de procesos industriales.
- Que el sistema desarrollado ofrezca facilidades para agregar, actualizar, o modificar la estructura interna del sistema, sin que se pierda su confiabilidad.

Claro que el sistema por sí sólo es muy extenso y con muchas más aplicaciones, por lo que nos enfocaremos en gran parte a su funcionamiento y no tanto a cómo programarlo en sus muchas formas en que es posible hacerlo.

### 5.3.1 PRINCIPIOS DE DISEÑO DE INTERFASES DE USUARIO.

En el ámbito de la tecnología en interfases hombre-máquina, se hacen muchas investigaciones, de tal manera que los desarrollos actuales tienden a ser *consistentes, fáciles de usar y fáciles de aprender*. Entre otros aspectos importantes están el *reuso del software* y la *adaptación* de estos desarrollos a otras aplicaciones distintas para las que originalmente fueron creados.

La meta clave en el diseño de interfases de usuario es: *incrementar la velocidad de aprendizaje y uso, reducir la razón de errores, alentar el recuerdo de cómo usar la interfaz y hacer atractiva la interfaz para incrementar su preferencia*.

Antes de proceder al diseño de interfases hombre-máquina para sistemas de supervisión y/o monitoreo de variables, es importante considerar los detalles propios de ambientes industriales que afectan a la actividad humana, como son los factores *extraindividuales* (contexto de trabajo, características de las tareas y del equipo, consignas de trabajo), factores *intraindividuales* (tensión fisiológica, tensión psicológica), y los factores *individuales* (formación, experiencia, personalidad, inteligencia, etc.); así como de los principios de despliegue de información; y después realizar un análisis para especificar y diseñar los mecanismos de diálogo más oportunos para estas aplicaciones. El éxito para seleccionar y elaborar las imágenes en pantalla depende de aproximarse lo más posible a las imágenes operativas que tengan los operadores acerca del proceso y de las tareas que deben realizar.

El diseñador de una interfaz de usuario debe seleccionar e incluir las técnicas interactivas y los dispositivos físicos que mejor se ajusten tanto a las características del usuario como de los requerimientos específicos de la tarea y que minimicen el trabajo requerido por tres tipos de procesos humanos básicos: **percepción, cognición, y actividad motora**.

En la actualidad algunas empresas que se dedican al desarrollo de software para control de procesos, están construyendo herramientas integradas de configuración de despliegues, de bases de datos, de generación de reportes, etc. Siendo una de las

principales actividades llegar a tener el software de la aplicación, que proporcione las características de la aplicación en términos de entradas al sistema, algoritmos de control a usar, funciones que va a realizar y tipos de despliegues que serán usados.

Los ambientes visuales para el desarrollo de interfasas de usuario, simplifican aspectos de programación como la edición de ventanas, menús y objetos gráficos ya que éstos son especificados gráficamente en lugar de tener que escribir código textual en algún lenguaje de programación.

***Factores que afectan el diseño de diálogos:***

- El diseño correcto de la distribución, ubicación y tamaño de los elementos de las imágenes proyectadas en la pantalla, evita la sobrecarga mental, aumenta la precisión y la velocidad de respuesta del hombre y sobre todo disminuye la frecuencia de errores.
- El tiempo de exploración de imágenes sobrecargadas es mayor y aumenta la posibilidad de cometer errores de lectura, la densidad máxima de información depende de la cantidad de información requerida por las tareas y de las condiciones de observación del operador. Una recomendación es que cierta información sólo se presente a demanda explícita del operador, tales como identificadores, unidades de medida, ejes coordenados, etc; y que la información sea distribuida en varias páginas.
- No emplear los mismos principios de diseño para imágenes en las que el usuario dispone de mucho tiempo para observarlas, que para aquellas en las que se propicie tensión nerviosa o que existan presiones de tiempo. Como sugerencia para este caso, es mejor que no se sobrecarguen las imágenes para que éstas sean simples, precisas y fáciles de interpretar con el objeto de evitar errores.

- La forma de presentar la información en pantalla debe ser atendiendo las características de la memoria de acceso rápido del usuario, por lo tanto la forma de codificación debe ayudarlo a comprender mejor su significado utilizando para tal efecto formas geométricas, alfanuméricas, colores, iluminación, parpadeo, etc; sin embargo el abuso de varias formas de codificación disminuye el rendimiento del usuario porque se obliga a memorizarlos todos.
- La tarea del diseñador es conservar las reglas de la interfaz de usuario y el vocabulario tan simples como se pueda, y usar conceptos del dominio del usuario o que los pueda aprender fácilmente.
- El lenguaje del diálogo hombre-máquina debe ser eficiente y completo, y debe tener reglas de secuenciación naturales.
- Con un lenguaje **eficiente** el usuario puede entrar a la computadora de forma rápida y precisa.
- Un lenguaje **completo** permite la expresión de una idea en el dominio del discurso.
- Las **Reglas de secuenciación**, definen el orden de la sintaxis del lenguaje. Debe tener un número mínimo de casos simples y fáciles de aprender. La simplicidad de las reglas de secuenciación, ayudan a minimizar el entrenamiento y le permiten al usuario concentrarse en la aplicación. Las reglas de secuenciación complejas introducen distracciones y discontinuidades en los procesos del pensamiento del usuario.
- Un lenguaje debe ser **extensible**. Esta cualidad adicional se le puede hacer al lenguaje del diálogo mediante la definición de nuevos términos como combinaciones de los ya existentes.

### *Múltiples ventanas.*

La técnica gráfica de definición de ventanas sobre una pantalla única, permite al usuario observar múltiples conjuntos de información al mismo tiempo. Típicamente las ventanas pueden ser manipuladas (usualmente con un "mouse") libremente sobre la pantalla. Pueden ser agrandadas o contraídas a un tamaño adecuado, arrastradas alrededor de la pantalla y traslapadas unas sobre otras. Las ventanas son particularmente apropiadas en ambientes computacionales "multitarea", en donde los resultados producidos por varias tareas pueden desplegarse en ventanas separadas simultáneamente. Los sistemas de múltiple ventaneo pueden ser aprovechables en:

- La descomposición de grandes cantidades de información sobre la pantalla con el uso de traslapes o compresión de ventanas.
- Accesar a múltiples fuentes de información. Con una ventana para cada fuente.
- La combinación de múltiples fuentes de información.
- Control independiente de múltiples programas.
- Para tener en cuenta la información que se vaya a usar en un futuro cercano. Quizás comprimida en un ícono.
- Para la presentación de múltiples representaciones de la misma tarea. Por ejemplo para diferentes vistas de un mismo objeto.

El tamaño de las ventanas es una restricción del uso de múltiple ventaneo. Si un usuario requiere de un número de ventanas durante cierto tiempo a fin de ejecutar su tarea eficientemente; y su conjunto de ventanas de trabajo no pueden ser acomodadas en la pantalla, entonces el usuario trabajará ineficientemente invirtiendo mucho tiempo en la búsqueda de ventanas escondidas por el traslape o en borrar algunas de ellas con objeto de hacer espacio para colocar las nuevas.

### *Iconos.*

Unos símbolos gráficos llamados iconos están siendo cada vez más usados en aplicaciones computacionales. Objetos familiares de cosas de oficina tales como archiveros, carpetas de cartón, cesto de basura, calculadoras, etc; se pueden representar simbólicamente y pueden ser seleccionados apuntándolos con algún dispositivo físico para tal efecto.

Entre las razones del uso de iconos en interfases hombre-máquina se encuentran:

- Los iconos son visualmente más distintivos que un conjunto de palabras que describan el mismo objeto.
- Pueden representar mucha información en un espacio reducido.
- Subjetivamente son más deseables que el uso de texto.

Se ha encontrado que una interfaz basada en menús de iconos contra un medio alfanumérico es preferida por la mayoría de la gente, porque cuando los iconos son diseñados apropiadamente, parecen naturales, más fáciles de usar y aprender, requieren de poca memorización y a fin de cuentas se reducen los errores.

### *Manipulación dinámica.*

Es invaluable la habilidad para manipular o editar partes o componentes de un dibujo, una vez que una versión inicial ha sido producida. El usuario es habilitado para **trasladar, escalar, girar, enfocar (zoom), duplicar, o borrar** un componente gráfico especificado de un dibujo. La aplicación del concepto de banda elástica (rubber banding) también es importante al permitir que el componente siendo manipulado sea redibujado continuamente con cada operación. Así que durante una operación de traslación, el componente puede ser arrastrado a través de la pantalla, mientras que para una operación de escalamiento el movimiento de un localizador a lo largo de un mundo escalado va a producir cambios continuos en el tamaño del objeto sobre el que se opera.



Un aspecto clave de manipulación gráfica es el medio por el cual el usuario puede especificar el componente que se desea editar. Una forma se conoce como **segmentación**, en donde el usuario define a los componentes como segmentos, cada uno de los cuales puede ser manipulado independientemente. Una segunda alternativa se basa en la técnica de **ventaneo**, en donde el usuario especifica las esquinas de cualquier rectángulo en la pantalla, y esta área de la superficie de la pantalla pasa a ser el elemento gráfico que se va a manipular. Con la técnica de banda elástica la ventana puede ser expandida o contraída antes de seleccionar el componente gráfico que se desea editar.

#### *Definición de herramientas de programación.*

Tomando en cuenta las consideraciones de Abel Archundia<sup>15</sup>, al seleccionar el lenguaje de implementación del sistema, se determinó usar C++ como el lenguaje de programación para el desarrollo ya que por un lado es posible obtener calidad de software, así como también es posible que se aprovechen las facilidades que ofrece un lenguaje que soporte el paradigma de orientado a objetos en aplicaciones gráficas.

Desde el punto de vista de la calidad del software se considera confiabilidad, reusabilidad y mantenibilidad. Al liberar un módulo de software se le considera totalmente probado y por lo tanto confiable, su comportamiento está íntegramente descrito permitiendo la reusabilidad para hacer desarrollos incrementales usando herencia de comportamiento (clases), el desarrollo se hace modularmente haciendo uso de las propiedades de encapsulado lo que permite hacer cambios funcionales a un módulo sin que esto repercuta en la totalidad del sistema.

Dentro de este enfoque, es el ingeniero en computación al que le ha tocado hacer la respectiva programación del sistema, y toca al usuario u operador programar en modo de ventanas para hacer las simulaciones de medidas de variables en un proceso industrial.

---

<sup>15</sup> Abel Archundia, Programación orientada a objetos en un ambiente puro, PC/TIPS BYTE, México, Mayo 1992, pp. 93-94.

## 5.4 ARQUITECTURA DEL ADIU.

### 5.4.1 DESCRIPCIÓN CONCEPTUAL DEL ADIU.

Haciendo referencia a la **figura 5-2**, la presentación visual del **ADIU** incluye:

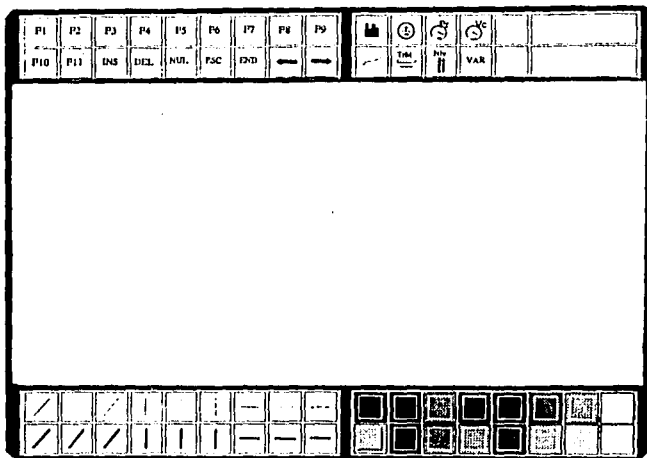
**La Paleta de Colores.** Consiste de una barra de dieciséis botones de selección de colores. Esta paleta es utilizada en la edición de atributo de los objetos desplegados en el área de aplicación del usuario.

**La Paleta de Líneas.** Consiste de una barra de dieciocho botones de selección de estilo, espesor y dirección de líneas. Las alternativas de selección para el estilo son tres: Continua, Punteada y Guionada. Las alternativas de selección de espesor son dos: Simple (de un pixel) y gruesa (de tres pixeles). Por último las alternativas de dirección son tres: Línea ortogonal vertical, Línea ortogonal horizontal y Línea no ortogonal.

**La Paleta de Funciones.** Consiste de una barra de dieciocho botones de selección de funciones del controlador del diálogo de la interfaz. Las alternativas de selección son:

- "F1"** Solicitud de ayudas.
- "F2"** Para salvar en disco una pantalla o una gráfica.
- "F3"** Edición de los atributos.
- "F4"** Para redimensionar una ventana.
- "F5"** Recuperar desde disco a una pantalla o una gráfica de monitoreo.
- "F6"** Asocia una variable de control a una ventana.
- "F7"** Arrastrar una ventana por la superficie de la pantalla.
- "F8"** Para redistribuir en forma de mosaico a todas las ventanas abiertas en una pantalla.
- "F9"** Refresca una pantalla completa.
- "F10"** Asocia una gráfica de monitoreo a una ventana.
- "F11"** Hace visible o no visible el cursor del mouse.
- "ESC"** Siempre regresa al evento del estado anterior.
- "INS"** Para la creación de ventanas.

- "DEL"** Borra una ventana.
- "END"** Termina la ejecución del programa.
- "NUL"** Regresa automáticamente, despues de haber ejecutado una acción.
- "-."** Aumenta la resolución de la gráfica.
- ".."** Disminuye la resolución de la gráfica.



**FIGURA (5-2). AMBIENTE DE DESARROLLO DE INTERFASES DE USUARIO (ADIU).**

**La Paleta de Gráficas.** Es una barra de ocho botones de selección para asociar gráficas de monitoreo a ventanas o para asociar variables a gráficas de monitoreo. Las alternativas son: **Gráfica de barras, Gráfica de Tendencias, Carátula de reloj, Termómetro, Indicador de Nivel, Barómetro, Compresómetro y Variables.** Con cualquiera de las opciones se abrirá un cuadro de diálogo con un listado de los nombres de archivos correspondientes a las gráficas ya configuradas. De elegirse la opción de variables se abrirá un cuadro de diálogo con un listado de las variables o parámetros del proceso.

**El Área de la Aplicación.** Es la porción de la pantalla destinada para las respuestas de salida de la aplicación. Cada vez que se oprima <INS> por medio del teclado o apuntando con el mouse el botón correspondiente de la paleta de funciones, se hará la creación de objetos de la clase ventana. Esta porción de la pantalla está bajo el control del administrador de la pantalla.

**Ventana de Coordenadas.** La esquina superior derecha de una pantalla se destinó para desplegar las coordenadas del cursor del mouse.

La selección de opciones de cualquiera de las paletas descritas se realiza apuntando con el mouse el botón correspondiente. En el caso de asociación de atributos a objetos del área de aplicación, son necesarios dos clicks con el mouse. El primero se hace para elegir la opción y el segundo para apuntar al objeto sobre el que se ejecutará la acción.

En lugar de usar el mouse, opcionalmente se pueden oprimir las teclas de funciones del teclado para realizar la selección de eventos del diálogo.

Estando en modo de configuración, al oprimir la tecla <F10> o pulsar con el mouse el botón correspondiente, se abrirá una sesión para configurar una gráfica de monitoreo.

En la **figura 5-3**, se presenta visualmente el Ambiente de Desarrollo de Gráficas de Monitoreo que consta de lo siguiente:

**La Paleta de Colores.** Consiste de una barra de dieciséis botones de selección de colores. Esta paleta es utilizada en la edición de los atributos de las primitivas gráficas.

**La Paleta de Líneas.** Consiste exactamente igual que en la paleta de líneas para la presentación visual del ADIU.

**La Paleta de Primitivas Gráficas.** Es una barra de catorce botones de selección para configurar una gráfica de monitoreo. Las alternativas de selección son: **Cuadro, Círculo, Polígono, Elipse, Arco de Línea, y Texto**; además **permite ver a la gráfica de barras, Gráfica de Tendencias, Carátula de Reloj, Termómetro, Indicador de nivel, Barómetro, Compresómetro, también como primitivas; a su vez se proporciona un botón de escape "ESC" para regresar al evento anterior.** Con las opciones de primitivas de gráficas de monitoreo se abrirá un cuadro de diálogo para recibir los datos de entrada, tales como las coordenadas del mundo real.

**La Paleta de Ashurado.** Es una paleta de seis botones de selección de patrones de relleno para la configuración de gráficas.

**El Área de la Aplicación.** Esta porción en la pantalla está destinada para las respuestas de salida de la aplicación.

**Ventana de Coordenadas.** La esquina inferior derecha de la pantalla se destinó para desplegar las coordenadas del cursor del mouse.

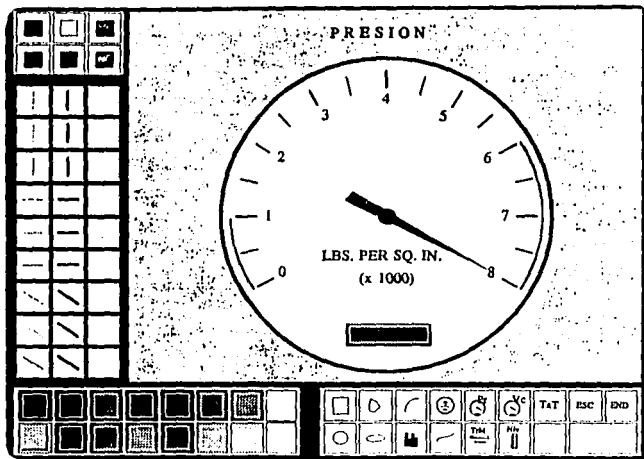


FIGURA (5-3). EDITOR DE GRAFICAS DE MONITOREO (EDIGRAF).

### 5.4.2 ARQUITECTURA DEL ADIU.

La arquitectura propuesta para el Ambiente de Desarrollo de Interfases de Usuario (ADIU) para el SADRE, está basada en el modelo de programación orientado a objetos y consta de ocho capas programadas modularmente figura 5-4.

La capa más baja consiste del nivel de componentes electrónicos de la máquina que incluye la memoria RAM, la memoria secundaria, el procesador, la tarjeta gráfica, los dispositivos de despliegue y los dispositivos físicos que se asociarán a las técnicas de interacción para dar información a la computadora. Las siete capas superiores son de programas de computadora que van de algoritmos de bajo nivel que inciden de manera directa en los componentes electrónicos de la máquina hasta los algoritmos de más alto nivel que se separan de la arquitectura de la máquina y se apoyan en la programación de las capas inferiores.

La primera capa de programas consta de los servicios ofrecidos por el sistema operativo que pueden ser utilizados vía interrupciones BIOS y a DOS.

La capa de algoritmos de base costa de un paquete de programas de bajo nivel que permitirán el mejor uso de los dispositivos físicos de la máquina, tales como la programación de puertos y de la memoria de video.

La capa de primitivas gráficas consta de los algoritmos básicos que ofrecen soporte para representar en pantalla objetos gráficos tales como puntos, líneas, polilíneas, polígonos, textos; atributos de primitivas tales como anchura de líneas, color, relleno de polígonos, tamaños de letras, algoritmos de segmentación gráfica, algoritmos de recorte, algoritmos de manipulación de bloques de bits, algoritmos de banda elástica, etc.

El sistema de configuración de pantallas permitirá al usuario observar múltiples conjuntos de información sobre una pantalla única por medio de manipulación de ventanas. La función básica de esta capa será la de administración de los espacios de la pantalla. Como es típico las ventanas son manipuladas (usualmente con mouse) libremente sobre la pantalla. Pudiendo agrandarlas o contraerlas, arrastrarlas, según sea la necesidad del usuario.

Las técnicas de interacción es uno de los más importantes elementos en el diseño de interfaces de usuario interactivas. Esta es la selección de las técnicas y sus correspondientes dispositivos físicos, por medio de las cuales el usuario efectúa tareas elementales. Una *tarea interactiva* es la entrada de unidades de información a la computadora por el usuario.

El mecanismo de control de diálogo debe dar soporte al diseñador para la construcción de la interfaz del usuario que incluye la configuración de la estructura de datos de pantallas, asociación de una o más variables, de los menús de selección y de los diálogos identificados con la aplicación. Como resultado de la configuración de la interfaz hombre-máquina se tendrán por un lado a la estructura de datos de las imágenes en pantalla, de los menús de selección y por otro lado la generación del código del diálogo que va a operar sobre esta estructura de datos.

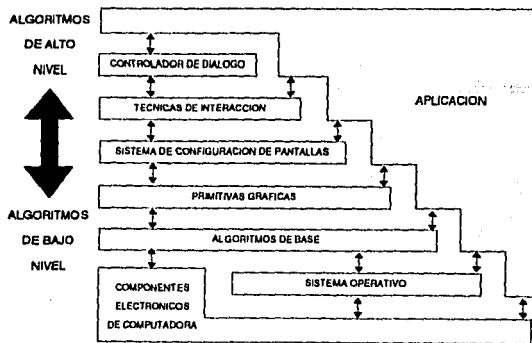


FIGURA (5-4). MODELO CONCEPTUAL DEL AMBIENTE DE DESARROLLO DE INTERFASES DE USUARIO (ADIU).

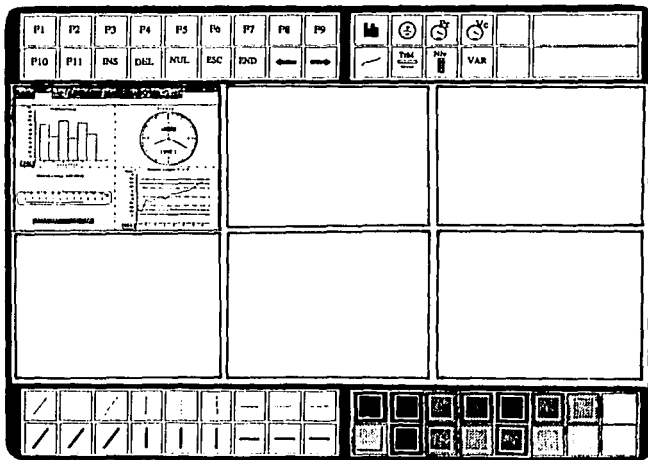


*DISEÑO CONCEPTUAL.*

Aquí está la definición de los conceptos de la aplicación que deben ser dominados por el usuario, o por el operador que este realizando las mediciones del proceso industrial. Define los objetos, sus propiedades, sus relaciones y las operaciones sobre ellos.

*Descripción conceptual de "pantalla".*

Haciendo referencia a la **figura 5-5**, una pantalla consiste como ya habíamos mencionado de: El Area de Aplicación, La ventana de Coordenadas del Mouse y un grupo de paletas de botones de selección, entre las que se cuentan las siguientes: La paleta de Colores, La paleta de Líneas, La paleta de Funciones, La paleta de Gráficas. Las alternativas de selección de las paletas de botones se otorgan de acuerdo a las atribuciones que se les confieren a los diálogos.



**FIGURA (5-5). MODELO CONCEPTUAL DE UNA PANTALLA.**

Por ejemplo para el diálogo del operador, de la paleta de Funciones sólo los botones (o las teclas correspondientes) "F1", "F2", "F5", "F7", "F8", "F9", "F11", "ESC", "END", "-" y "-" le son disponibles ya que al operador no se le faculta para "F3" (edición de atributos de ventana), "F4" (redimensionamiento de ventana), "F6" (asociar una variable de control a una ventana), etc.

En el momento de configuración de una pantalla, cada vez que se oprima la tecla "INS" o se apunte el botón correspondiente con el Mouse, se ejecutará el constructor de ventana, pudiéndose crear tantas ventanas como se tenga disponibilidad de memoria RAM, y el área de aplicación serán desplegadas todas estas ventanas. Ver **figura 5-5**.

Las operaciones válidas sobre los objetos de la clase Pantalla son: Inicialización, Creación de ventanas, Visualización, Salvar y Recuperar hacia y desde disco, Destruir una Pantalla.

#### ***Descripción conceptual de "Ventana".***

Una ventana es una porción rectangular de la pantalla o terminal de una computadora, que se encuentra bajo el control de la aplicación. Sus atributos incluyen el color de la ventana, el estado **ON/OFF**, el número de ventana, el color del botón de control, el color del texto del número de ventana y el color del marco del botón de control.

En la **figura 5-6**, tenemos una presentación visual de una ventana la cual consta de:

**El Marco.** Cada ventana está delimitada por un marco. Los atributos del marco son: Color, Espesor y Estilo de las líneas del marco.

**El Título.** Opcionalmente cada ventana puede tener asociado un título, de conformidad con la aplicación. El título está enmarcado en una barra y puede ubicarse en seis posiciones de la ventana, en el margen superior extremo izquierdo, en el margen superior al centro, en el margen superior extremo derecho, en el margen inferior extremo izquierdo, en el margen inferior al centro y en el margen inferior extremo derecho.

**El Area de la Aplicación.** Es la porción de la ventana en donde la aplicación va a desplegar sus respuestas de salida. En ella se le pueden asociar una, dos o cuatro gráficas de monitoreo, en el momento de configuración o en el momento de creación de la ventana, mediante la tecla <F10> o apuntando con el mouse el botón correspondiente.

**La Curva.** Cada ventana tiene asociada una porción de memoria RAM, en la que se respalda la porción de la memoria de video que va a ser sustituida por la ventana en el momento de hacerla visible en pantalla. Esto con el objeto de recuperar esta porción de memoria de video original, cuando una ventana se borra de pantalla, siendo de utilidad para operaciones de redimensionamiento, arrastre, y traslape de ventanas.

Las operaciones válidas sobre los objetos de clase ventana son: Crear, Destruir, Editar, Redimensionar, Arrastrar, Abrir, Cerrar, Asociar variables y gráficas de monitoreo.

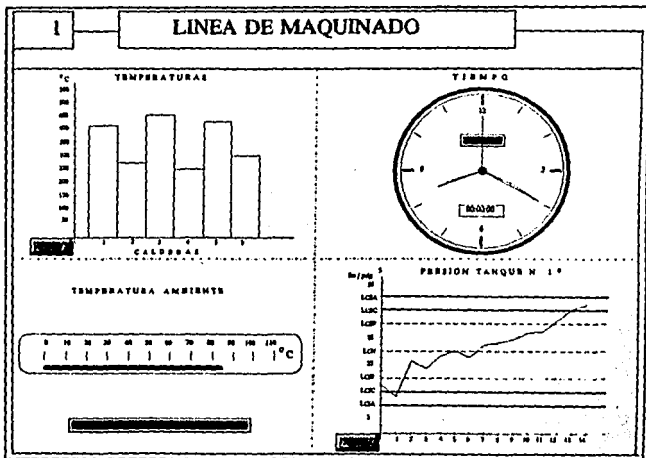
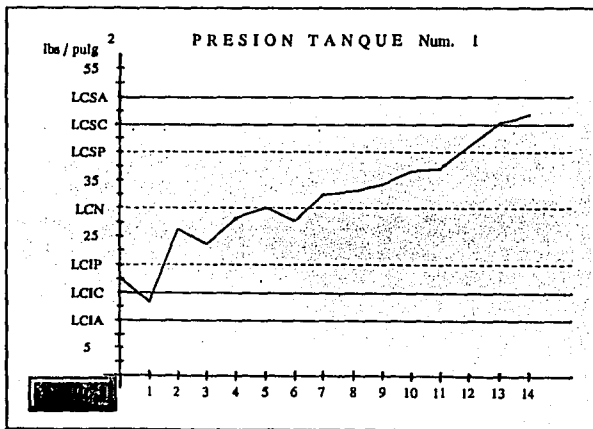


FIGURA (5-6). MODELO CONCEPTUAL DE UNA "VENTANA".

**Descripción conceptual de "Gráficas".**

Una gráfica es el medio visual con el que se presentarán los valores adquiridos de las variables de proceso. Cada gráfica consta de primitivas tales como: Líneas, Círculos, Elipses, Puntos, Texto, etc., de atributos de primitiva tales como: color, tipo de línea, patrón de relleno, etc. Por ejemplo en la **figura 5-7** se ilustra una gráfica de tendencias.

Los elementos que conforman esta figura son: Un sistema de coordenadas formado por una línea horizontal (eje X's), una línea vertical (eje Y's) y varios segmentos de línea para representar la escala de valores en los ejes coordenados. Siete líneas que representan los límites superiores o inferiores de control. Una poligonal abierta, la cual representa los valores históricos de la variable del proceso. El texto de la escala de valores de ambos ejes coordenados, texto de unidades de medida, título de la gráfica. Y además un botón que indica el estado actual de la variable, y que mediante su opresión el operador reconoce el estado.



**FIGURA (5-7). GRAFICA DE MONITOREO DE TENDENCIAS.**

De la misma manera se puede describir a la **Gráfica de Barras, Carátula de Reto, Termómetro, Indicador de Nivel, Barómetro, Compresómetro** que se muestran en la figura 5-8.

De ser necesario configurar otra gráfica diferente el ambiente proporciona los elementos para dibujarla, creando el código dinámicamente.

A cada ventana se le pueden asociar una, dos o cuatro gráficas de este tipo. Y a cada gráfica se le puede asociar una o un grupo de variables o parámetros de proceso.

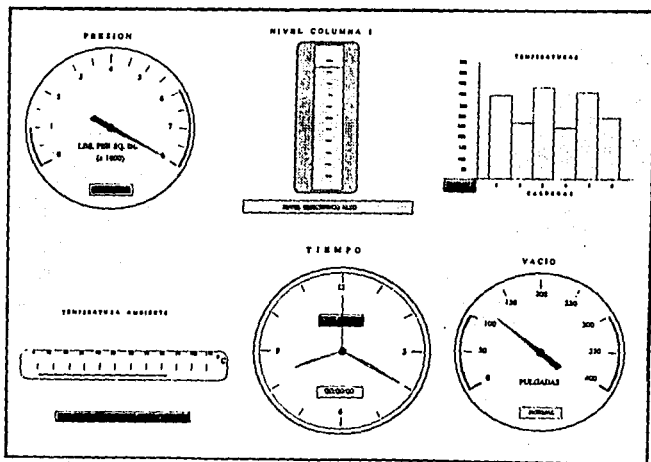


FIGURA (5-8). DIFERENTES GRAFICAS DE MONITOREO DE PROCESOS.

El sistema por sí sólo puede tener algunas complicaciones, si su uso está enfocado a el diseño de pantallas, es decir a la programación visual de interfases de usuario, pero si en cambio, el diseño ya está realizado y este es prototificado, e implementado rápidamente, con posibilidades de incorporar cambios no previstos, se libera al ingeniero de proceso de la tarea de construir programas para las diferentes presentaciones de pantallas de monitoreo de variables. Con esto es posible observar el comportamiento del proceso antes de llevarlo a cabo, reduciendo los costos y por supuesto aplicar este tipo de software a proyectos de control de procesos industriales. Esto es importante mencionarlo, dadas las condiciones particulares que tiene cada sistema de control, en este caso el sistema sólo nos ayuda a monitorear en pantalla las variables de un proceso, pero pronto podrá accionarse y corregir con él los controladores físicos del propio sistema de control.

Hoy en día estos diferentes tipos de programas tienen muchas aplicaciones, en los cuales la simulación es bastante común, de ahí que los utilizemos con frecuencia, ya que no podemos darnos el lujo de fallar estando el proceso en curso, por lo que una simulación es mejor antes que se tengan errores mayores.

---

## CONCLUSIONES.

En la actualidad, y así lo hemos venido reiterando, la computadora está resultando muy indispensable en muchas de las tareas cotidianas, desde las sencillas hasta complejos problemas que se presentan en grandes industrias. Por lo que hoy en el presente trabajo de investigación se le ha abierto un espacio para enfocarlo a sistemas de control, los cuales a su vez tienen una gran variedad de aplicaciones ( control aéreo, control marítimo, control productivo, etc.), pero en esta ocasión lo interpretamos específicamente para controlar un proceso industrial. Con ello, sabremos interpretar como la computadora puede, y así está especificado en el tema de tesis, ayudarnos a desarrollar sistemas de control que nos enlacen a un proceso, ya sea, en primer término ejecutando programas previamente establecidos que accionen a sistemas sensores y actuadores que permitan ejecutar una tarea para beneficio del propio proceso; en segundo término a partir de que tengamos a la computadora como una interfaz en la que por medio del software apropiado hagamos simulaciones del comportamiento del proceso y su propio sistema de control, o bien resolver complejos sistemas de funciones en los que intervengan las variables del proceso.

Los beneficios del uso de la computadora fueron claramente vistos, y es el ingeniero en sistemas de control el que podrá decidir la implementación de un sistema de control usando la computadora, de esta forma hará que su desempeño del control se optimice, teniendo en consecuencia grandes ventajas para lograr que no sólo para un proceso industrial es útil, sino para más tareas desprevistas, como vimos en el capítulo 4 en donde nos ayuda la computadora a hacer una planeación en modo de agenda para seguir los pasos y transformar una planta de procesos a una más moderna con sistemas de control distribuido; así que al implantar un sistema de este tipo observaremos un rendimiento gradual que se reflejará afirmativamente.

---

## B I B L I O G R A F I A .

- [1] R. Lockyer,  
**La producción industrial**; Ed. Alfaomega; México, D.F. 1988.
- [2] A.C. Solé,  
**Control de procesos industriales**; Ed. Marcombo.
- [3] J.A. Cadzow,  
**Discrete-time an computer control systems**; Englewood Cliffs, N.J, EUA. 1970.
- [4] C.L. Phillips,  
**Sistemas de control digital (análisis y diseño)**; México, D.F. 1987.
- [5] R.C. Dorf,  
**Sistemas automáticos de control teoría y práctica**; Argentina, México. 1988.
- [6] K.J. Astrom,  
**Computer controlled systems theory and Design**; Englewood Cliffs, N.J, EUA. 1954.
- [7] C.T. Leondes,  
**Computer control systems technology**.
- [8] G.J. Alistair, MacFrarlane,  
**Frequency response methods in control systems**; Ney York, EUA:IEEE 1979.
- [9] F.F. Gene,  
**Digital control of dynamic systems**; Reading, Massachusetts. 1990.
- [10] H.L. Harrison, J.G. Bollinger,  
**Controles automáticos**; Ed. Trillas; México. 1974.



- 
- [11] R.C. Dorf,  
**Sistemas modernos de control**; Ed. Addison-Wesley; Argentina-México. 1989.
- [12] P.G. Verdugo,  
**El computador digital como simulador de sistemas.**
- [13] G.S. Fishman,  
**Conceptos y métodos en la simulación digital de eventos discretos.**
- [14] T.J. Williams,  
**Ingeniería de procesos industriales.**
- [15] T.N. López,  
**Automatismo y control**; Ed. G. Gili; Barcelona, España. 1975.
- [16] K. Ogata,  
**Ingeniería de control moderna**; Ed. Prentice Hall; México. 1974.
- [17] R.S. Santaolaya,  
Tesis: **Ambiente de desarrollo para la programación visual de interfaces de usuario para monitoreo de procesos en línea.**  
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. (CENIDET), 1994.
- [18] J. M<sup>a</sup>. Angulo; J. No,  
**Control de procesos industriales por computador.**
- [19] Revista Siemens, Abril/junio, # 2/88, 1988.
- [20] Revista Siemens, Julio/Septiembre, # 3/87, 1987.