

81A

rej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

LA INGENIERIA QUIMICA Y SU INTEGRACION CON
OTRAS DISCIPLINAS, PARA EL DESARROLLO
DE UN PROYECTO INDUSTRIAL.

T e s i s M a n c o m u n a d a

Que para obtener el título de:
INGENIERO QUIMICO

P r e s e n t a n :

JOSE LUIS ORTEGA RAMIREZ
MARCELA RODRIGUEZ JAIME



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.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

INDICE

	Página
• Introducción.	6
1.- Interacción con el área económica.	11
1.1.- Costos y gastos.	11
1.2.- Inversión.	12
1.3.- Conceptos para estimar la inversión fija.	13
1.4.- Métodos para calcular la inversión fija.	14
1.5.- Estimación del costo del equipo de proceso.	21
1.6.- Capital de operación o de trabajo.	23
1.7.- Influencia del diseño en el costo del equipo.	25
1.8.- Economía de reemplazo.	26
1.9.- Costos de operación o de producción.	29
1.10.- Conceptos contables y estados financieros.	34
1.11.- Evaluación de proyectos de inversión.	40
1.12.- Valor del dinero en el tiempo.	42
2.- Coordinación del área civil.	44
2.1.- Fuerzas, cargas y esfuerzos.	44
2.2.- Propiedades geométricas de las formas estructurales.	51
2.3.- Códigos de construcción para plantas de proceso.	56
2.4.- Concreto reforzado para estructuras y equipos.	59
2.5.- Estructuras de mampostería.	64
2.6.- Construcción con formas de acero para estructuras de proceso.	66
2.7.- Soportes para vasijas de proceso y equipo de almacenamiento.	73
2.8.- Estructuras de acero y concreto para soportar equipo de proceso.	80
2.9.- Construcción de muros y techos para edificios de plantas y procesos.	87

3.- Aspectos básicos de corrosión y selección de materiales.	95
3.1.- Fundamentos de corrosión.	95
3.2.- Formas de corrosión.	96
3.3.- Polarización.	99
3.4.- Pasividad.	103
3.5.- Medición de la corrosión en plantas de proceso.	104
3.6.- Control del proceso y de la corrosión.	108
3.7.- Diseño de ingeniería para minimizar la corrosión.	111
3.8.- Protección anódica y catódica.	113
3.9.- Protección vía recubrimiento.	117
3.10.- Pinturas para prevenir la corrosión.	120
3.11.- Selección de materiales para el control de la corrosión.	124
3.12.- Resistencia a la corrosión de materiales.	126
3.13.- Apéndice.	130
4.- Aspectos generales de tuberías.	133
4.1.- Consideraciones generales.	133
4.2.- Selección de la tubería.	133
4.3.- Esfuerzos en la tubería.	135
4.4.- Análisis de flexibilidad.	139
4.5.- Arreglo de la tubería.	148
4.6.- Soportes para la tubería.	154
4.7.- Tuberías de servicio.	157
4.8.- Válvulas y puntos de sangrado.	159
5.- Aspectos de la ingeniería eléctrica.	163
5.1.- Conceptos básicos.	163
5.2.- Transformadores eléctricos.	165
5.3.- Motores eléctricos.	172
5.4.- Alambres y cables eléctricos.	180
5.5.- Interruptores eléctricos.	184
5.6.- Iluminación en plantas de proceso.	190
5.7.- Mecanismos de protección eléctrica.	197
5.8.- Mantenimiento preventivo de sistemas eléctricos.	204

6.- Instrumentación y control.	209
6.1.- Conceptos básicos, terminología y técnicas para el control.	209
6.2.- Modos de control retroalimentado.	217
6.3.- Ajuste de los controladores de proceso.	230
6.4.- Métodos retroalimentados para el control de sistemas.	237
6.5.- Controladores de síntesis directa y adaptativos.	247
6.6.- Cómo usar los lazos retroalimentados para satisfacer las condiciones de proceso.	254
7.- Simulación dinámica de proceso.	270
7.1.- Fundamentos básicos.	271
7.2.- Solución de los modelos matemáticos para sistemas dinámicos.	284
7.3.- Modelación de procesos en computadoras analógicas e híbridas.	290
7.4.- Modelando sistemas de proceso vía computadoras digitales.	293
7.5.- Modelos para sistemas de transferencia de calor.	294
7.6.- Modelo dinámico de sistemas de reactor tipo tanque.	302
7.7.- Modelación dinámica de sistemas de reactor tubular.	306
7.8.- Modelando el equilibrio de fase en sistemas dinámicos.	311
Conclusiones.	318
Bibliografía.	320

Introducción.

Para el desarrollo de un proyecto en la industria química en general, que reúna los requisitos de máxima economía, óptima calidad y oportunidad adecuada, es necesario contar con recursos humanos de alta capacidad.

Una de las cualidades que debe reunir el personal responsable de la administración y control de este tipo de proyectos, es tener una visión amplia y adecuada de todos los aspectos involucrados en su desarrollo, desde la concepción de una idea hasta la operación normal de una planta química.

Las etapas involucradas normalmente, contemplan lo siguiente:

- Concepción de una idea.
- Investigación a nivel laboratorio.
- Pruebas a nivel planta piloto.
- Estudios de factibilidad.
- Escalamiento a nivel industrial.
- Ingeniería conceptual.
- Ingeniería de detalle.
- Adquisición de equipo.
- Inspección.
- Construcción.
- Montaje de equipo.
- Pruebas de arranque.
- Operación normal.

Apartir del desarrollo de la ingeniería conceptual, intervienen diversas especialidades, tales como: Ingeniería Económica, Ingeniería Civil, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Mecánica, Instrumentación e Ingeniería Química, entre otras. Históricamente, en la mayoría de los proyectos ha correspondido a los ingenieros químicos la administración y coordinación de los proyectos, y para lograr los objetivos señalados anteriormente, ha necesitado de una formación integral que le permita no sólo manejar el lenguaje de las otras especialidades, sino contar con el criterio suficiente para evaluar los resultados y tomar las decisiones correctas. A este tipo de ingeniero químico se le ha llamado Ingeniero de Proyecto, ya que esta disciplina permite integrar en un alto porcentaje las especialidades mencionadas anteriormente.

Apartir de la década de los 40's los ingenieros de proyecto se formaban en la práctica, de tal manera que el paso de los años conjuntado con la participación en diversos proyectos conformaba, durante un periodo de 7 a 10 años, a un personal con la capacidad suficiente para ejercer la jefatura de un proyecto.

En la actualidad y apartir de la década de los 80's se ha estructurado una maestría en Ingeniería de Proyectos, dentro de la división de estudios de posgrado de la Facultad de Química, con el fin de "catalizar" el proceso de formación de tales recursos humanos.

Considerando la maestría mencionada y el nuevo plan de estudios de la carrera de Ingeniería Química, en el cual se concibe una materia denominada Ingeniería de Proyectos, que se lleva en el último semestre de la carrera, se ha venido estructurando un material accesible para las nuevas generaciones que les permita tener una visión general a nivel licenciatura, de lo que se ve a profundidad a nivel maestría.

Este trabajo es solo una parte de dicha integración de material didáctico y comprende:

En el capítulo I se tratan aspectos de la ingeniería económica, ya que consideramos que la evaluación de un proceso consiste de un análisis tanto de ingeniería como de la economía del mismo. Este estudio económico debe iniciarse incluso, antes de efectuar cualquier trabajo de laboratorio, ya que un cuidadoso análisis de costos en una etapa inicial, indicará si el proceso propuesto es prometedor, y también nos puede sugerir la dirección de los experimentos.

El capítulo II presenta una serie de conocimientos relacionados con la ingeniería civil, esta especialidad es muy importante para el ingeniero químico, porque las bases de ingeniería de estructuras le permitirán hacer la transición de un diagrama de flujo o de tubería e instrumentación, a la obtención de la estructura final del proyecto.

El capítulo III, trata de algunas secciones que corresponden a la ingeniería mecánica, y dado que en otros trabajos ya se han cubierto aspectos como el diseño mecánico, elaboración de dibujos, etc. en esta tesis solo se mencionan los aspectos básicos de corrosión, siendo este un factor muy importante en las plantas de procesos químicos, ya que para seleccionar un material deben tomarse en cuenta muchas propiedades, incluyendo sus propiedades físicas, sin embargo, aquí hacemos hincapié en su resistencia a la corrosión, considerando las características del sistema.

En el capítulo IV se plantean aspectos generales de tuberías, ya que estas constituyen alrededor del 20% de los costos de una planta, y son una parte muy importante del proceso, por estas son el medio por el cual el equipo es interconectado y a su vez transportan tanto materias primas, intermedios, productos y hasta los servicios que requiere nuestro proceso.

Los aspectos básicos de la ingeniería eléctrica, que un ingeniero químico utiliza para el desarrollo de un proyecto industrial, se presentan en el capítulo V. Esta área es muy importante, ya que las plantas de procesos químicos tienen generalmente, un gran consumo de energía eléctrica, para suministrar poder y operar muchos de los equipos de proceso y para dar iluminación.

En el capítulo VI se contemplan aspectos básicos de instrumentación, ya que las industrias de proceso no podrían existir sin instrumentos que indicaran, registraran, controlaran y, en algunos casos se anticiparan a los muchos cambios que ocurren en un proceso. Aún en procesos que requieren de operación manual, los instrumentos le avisan al operador cuando debe actuar.

La simulación dinámica de procesos contempla el análisis de todas las relaciones físicas que permiten desarrollar y resolver en forma subsecuente, una serie de ecuaciones matemáticas. En la industria de procesos químicos se pueden presentar diferentes problemas y situaciones anormales, las cuales se deben prevenir mediante un diseño que considere emergencias y desastres potenciales en la planta. Debido a las razones anteriormente expuestas, en el capítulo VII se incluyen varios modelos de sistemas para su simulación dinámica.

C A P I T U L O I

INTERACCION CON EL AREA ECONOMICA.

La evaluación de un proceso consiste del análisis tanto de la ingeniería como de la economía de un proceso y, en su sentido más amplio es una operación continua.

El incremento de la competitividad en la industria moderna, requiere de un esfuerzo considerable para obtener una reducción de costos, en procesos ya existentes o para minimizar el costo de futuros procesos. El ingeniero químico debe estar bien informado de la relación entre los factores técnicos y los económicos, ya que en particular estos últimos afectan en gran medida la rentabilidad; por ello es muy importante conocer el lenguaje de contabilidad, para facilitar una buena comunicación con los profesionales en la materia.

La ingeniería de costos puede decirse que es como un lenguaje o puente, que cierra la brecha entre los aspectos técnicos de un proyecto y los factores económicos sobre los cuales se basa la decisión final de la administración; mediante ella, podemos hacer más efectiva la capacidad del ingeniero, ya que esto lo convierte en un consejero o consultor de una administración.

Clasificación de costos y gastos.

Gasto.— Es una erogación monetaria pendiente de aplicación en el tiempo, para obtener un servicio o realizar una actividad. Normalmente tiene una periodicidad fija para varios conceptos, por ejemplo, compra de materias primas, pago de sueldos y salarios, compra de repuestos, pago de impuestos, etc.

Costo.— Es lo que cuesta un bien, aquel valor que representa el monto total invertido para producir un bien o servicio. Por lo tanto podemos decir que los costos pueden incluir varios conceptos de gasto.

* **Costos directos.**— Son aquellos que dan lugar a la instalación permanente de los componentes físicos del proyecto, por ejemplo: equipo de proceso, estructuras y soportes, equipo eléctrico, etc.

* Costos indirectos.- Gasto repetitivo con el propósito de llegar a un producto, por ejemplo: materias primas, materiales auxiliares, servicios, etc.

* Costo total.- Suma de costos fijos y costos variables: $C_T = C_F + C_V$

* Costo de producción.- Son los costos relacionados directamente con la producción.

Clasificación de estimados de costo por su exactitud.

Un estimado es la evaluación de todos los costos que intervienen en un proyecto, bien o servicio, y se clasifican como:

1.- Estimado de orden de magnitud.- Aproximado, se realiza sin información detallada de ingeniería, tiene una precisión de + 50% a - 30% ; \pm 30%.

2.- Estimado Preliminar o Presupuestal.- Se prepara utilizando diagramas de flujo, listas de equipo y arreglos de equipo; tiene una exactitud de + 40% a -15% ; \pm 20%.

3.- Estimado Definitivo o detallado.- Se prepara utilizando información de ingeniería muy detallada, los datos deben incluir planos de localización de equipos completos, dimensionamiento y evaluación de equipos, diagramas de tubería e instrumentos, diagrama unifilar, hojas de datos de equipo, cotizaciones, estudios de estructuras, edificios, cimentaciones mayores y especificaciones; tiene una exactitud de -15% a - 15% ; \pm 5 a 10%.

Inversión.

Económicamente la inversión es la colocación de algún capital en alguna actividad comercial, durante cierto tiempo, para obtener un rendimiento, ya sea en utilidades o en intereses.

En el sentido general la inversión va a ser una erogación destinada a cumplir un fin específico. Cuando se habla de instalaciones industriales la inversión, es el gasto monetario requerido para la concepción, diseño, construcción y puesta en marcha de los medios productivos y su ulterior operación.

Estimado de la inversión total.

Inversión Fija (capital fijo).....	\$ _____
+ Capital de operación.....	\$ _____
<hr/>	
Inversión Total	Σ \$ _____

La inversión fija se refiere a las instalaciones fijas del negocio y el capital de operación, es decir la cantidad de dinero necesario para operar la planta.

La inversión fija podemos definirla como el costo total de instalaciones de procesamiento, edificios, servicios auxiliares, etc. y representa dentro de la inversión total un 85 a 90 %.

Conceptos para estimar la inversión fija.

1.- Equipo de proceso.....	\$ _____
2.- Tubería.....	\$ _____
3.- Instrumentación.....	\$ _____
4.- Equipo eléctrico.....	\$ _____
5.- Estructuras y soportes.....	\$ _____
6.- Edificios y acabados.....	\$ _____
7.- Mano de obra y/o instalación y montaje.....	\$ _____
8.- Compra y acondicionamiento del terreno y accesos.....	\$ _____
9.- Servicios auxiliares (agua, vapor).....	\$ _____
10.- Oficinas e instalaciones generales....	\$ _____
COSTO DE PLANTA FISICO	\$ _____
11.- Ingeniería.....	\$ _____
12.- Construcción.....	\$ _____
COSTO DIRECTO DE PLANTA	\$ _____
13.- Garantías del contratista.....	\$ _____
14.- Imprecistos.....	\$ _____
INVERSION FIJA	\$ _____

Metodos para calcular la inversión fija.

Método 1. Costo de la planta física.

Este método requiere la estimación individual e independiente de cada elemento del costo de la planta física. Teniendo el costo de la planta física los otros componentes, para obtener el costo directo de planta, se estiman como un porcentaje del costo físico, de la misma manera la inversión fija se determina agregando al costo directo los conceptos adicionales evaluados como fracciones del costo directo de planta. Así tenemos, para ingeniería y construcción:

COSTO en MM *	COSTO DE INGENIERIA Y CONSTRUCCIÓN (% DEL COSTO FIJO)
Menos de 1000	30
De 1000 a 5000	25
Mayor a 5000	20 - 10

Las ganancias del contratista, dependerán del tamaño de la planta, complejidad, localización, y si se trata de un proceso novedoso o muy complicado, pero en general se pueden estimar del 4 al 10% del costo directo de planta. Se utiliza el lado bajo del porcentaje cuando es un proceso conocido, con un localidad accesible y el lado alto cuando es un proceso complejo y muy grande, localizado fuera de las urbes con pocos accesos.

Los imprevistos toman en cuenta gastos impredecibles, cambios de precios, errores de estimación, cambios de alcance, cambios pequeños de proceso, y lo aplicamos directamente al costo de planta:

NIVEL DE IMPREVISTOS	% DEL COSTO DIRECTO DE PLANTA
Bajo	10
Frmedio	15
Alto	25

Metodo 2. Del costo del equipo de proceso.

Se basa en el estimado del costo de equipo de proceso; los demás componentes del costo de la planta física se van a estimar como un porcentaje del costo del equipo, para este método se recurre a la siguiente información:

- Instalación de equipos:

CONCEPTO	% DE COSTO DE EQUIPO
Cimentaciones	7
Planta, formas y soportes	11
Montaje de equipo	15

- Tubería: Se determina como un porcentaje del costo del equipo:

PROCESO	MATERIAL %	MANDO DE OBRA %	TOTAL
Sólido	8	6	14
Sólido-fluido	21	15	36
Fluido	49	37	86

- Instrumentación:

GRADO DE INSTRUMENTACION	% DE COSTO DE EQUIPO
Poco o nada de control	5
Algunos controles específicos	15
Control extenso	30

- Aislamiento: Para equipo y tubería 8% del costo del equipo de proceso.

- Instalaciones eléctricas: Subestaciones eléctricas, tableros de control, alambrado y conexiones, 10-15% del costo del equipo de proceso.

- Edificios: (Costo de edificios construidos). Se basa en el costo/ m² de construcción.

COSTO DE EQUIPO	CONSTRUCCION EXTERIOR	CONSTRUCCION INTERIOR
Menos de 250 MM	50%	80%
De 250 a 1000 MM	40%	65%
Mayor a 1000 MM	30%	50%

- Compra de terreno: Depende de la localización de la planta. Hay que consultar con expertos en bienes raíces, solicitar datos a Clas. fraccionadoras y municipios, representa del 5 al 10%
- Acondicionamiento del terreno: Se toma de un 10-15%, de acuerdo a los accesos al terreno.
- Servicios auxiliares instalados:

TIPOS DE SERVICIOS	COSTO INSTALADO %
Servicios mínimos acondicionados	25
Servicios promedio	40
Servicios Nuevos completos	75

Finalmente, el costo del equipo de proceso es del orden del 40 al 50% de la inversión fija.

Método 3. Método de Lang.

Se basa en el costo del equipo de proceso, multiplicado por un factor que es función de la naturaleza física del proceso. Por medio de la siguiente relación:

$$I_f = EL \quad \text{donde: } I_f : \text{Inversión fija}$$

$$E : \text{Costo del equipo de proceso}$$

$$L : \text{Factor de Lang}$$

Factores de Lang para la inversión fija:

PROCESO	FACTOR
Sólido	3.10
Sólido-fluido	3.63
Fluido	4.74

Método 4. Método de Lang modificado por Chilton.

$$C_{pc} = (\sum F_i) C_{eq} \quad \text{donde: } C_{eq} : \text{costo del equipo}$$

$$C_{pc} : \text{inversión fija}$$

$$C_{pc} = R_1 Z_2 Z_3 Z_4 C_{eq}$$

Z_1 : Se utiliza para corregir o convertir el costo del equipo comprado a costo del equipo instalado, y se puede usar con los valores de:

- $\emptyset_1 = 1.45$ para proceso sólido
- $\emptyset_1 = 1.39$ para proceso sólido-fluido
- $\emptyset_1 = 1.47$ para proceso fluido.

\emptyset_2 y \emptyset_3 : Se evalúan con las siguientes ecuaciones:

$$\emptyset_2 = 1 + f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5$$

$$\emptyset_3 = 1 + f_6 + f_7 + f_8$$

- f_1 es un factor de costo para tubería de proceso.

RANGO	PROCESO
0.07-0.10	Sólido
0.10-0.30	Sólido-fluido
0.30-0.60	Fluido

- f_2 es un factor de costo edificios.

RANGO	UNIDADES
0.05-0.20	Intemperie
0.20-0.60	Intemperie-interiores
0.60-1.00	Interiores

- f_3 factor de costo para líneas externas

RANGO	CONDICION
0.00-0.05	Planta existente
0.05-0.15	Unidad separada
0.15-0.25	Unidades esparcidas

- f_4 factor de costo de tamaño o capacidad.

RANGO	PLANTAS
0.00-0.05	Grandes
0.05-0.15	Pequeñas
0.015-0.35	Experimentales

- f_4 es un factor de costo para instrumentación.

RANGO	CONTROL AUTOMATICO
0.02-0.05	Foco
0.05-0.10	Regular
0.10-0.15	Extenso

- f_4 factor de costo de instalaciones.

RANGO	CONDICION
0.00-0.05	Ampliación menor
0.05-0.25	Ampliación mayor
0.25-1.00	Planta nueva.

- f_5 factor de costo para ingeniería y construcción

RANGO	PLANTA
0.20-0.35	Normales
0.35-0.50	complejas

- f_6 factor de costo de contingencias.

RANGO	PROCESO
0.10-0.20	Definido
0.20-0.30	Sujeto a cambio
0.30-0.50	Tentativo o nuevo

Método 5. Método del costo de planta.

Este método se basa en el conocimiento de los costos de plantas de proceso y sus capacidades, como base para estimar el costo de plantas del mismo proceso y diferente capacidad, mediante la siguiente ecuación:

$$I_{r_B} = I_{r_A} \left(\frac{r_B}{r_A} \right)^f$$

donde: I_{r_B} : inversión fija de la planta B
 I_{r_A} : inversión fija de la planta A
 r_B : producción mensual o capacidad de la planta B
 r_A : producción mensual o capacidad de la planta A

f es un factor cuyo valor se determina de acuerdo a lo siguiente:

- 1.- Procesos químicos promedio, $f=0.7$
- 2.- Para instalaciones muy pequeñas o procesos con condiciones extremas de presión o temperatura, $f= 0.3-0.5$
- 3.- Para plantas que logran mayores capacidades, mediante el uso de unidades múltiples, más que el uso de equipo de mayor tamaño, $f=0.8$

Otra ecuación para este mismo método es:

$$C_{T_2} = C_{T_1} (W_2 / W_1)^f$$

donde: C_{T_2} = Costo de la planta completa a capacidad 2
 C_{T_1} = Costo de la planta completa a capacidad 1
 W_2 = Capacidad de la planta, condición 2
 W_1 = Capacidad de la planta, condición 1
 f = Exponente de correlación, costo-capacidad de la planta

f: existen datos publicados y son muy generales, y nos dan una orientación sobre la inversión fija, estos valores son obtenidos estadísticamente o por métodos matemáticos. Hay que escoger el valor de f, que más se acerque al proceso particular.

Variación del exponente para la relación costo-capacidad.

TIPO DE PLANTA	RUEDA DEL PROCESO	EXPONENTE
Acetileno	Pirolisis de hidrocarburos	0.65
Acrilonitrilo	Acetileno y ácido cianhídrico	0.60
Aluminio(lingote)	El más conocido	0.90
Amoniaco	Reformación de gas natural	0.58
Amoniaco	Síntesis	0.81
Butadieno	Butilenos	1.02
Butanol	Propileno, CO y agua	0.40
Cloro	Electrólisis de NaCl	0.45
Acido sulfúrico	Gas de fundición	0.91
Acido sulfúrico	De azufre	0.53
Etileno	Pirolisis con vapor, gases de refinería, nafta y gasoleo	0.83
Etileno	Gases de refinería	0.67
Oxido de etileno	Oxidación catalítica de etileno	0.78
Etilenglicol	Etileno, cloro y óxido de etileno	0.75
Fisher - Tropsh	Gasolina sintética	0.79
Oxígeno	Baja pureza	0.58
Metanol	CO y reformación de gas natural	0.60
Fenol	Oxidación de tolueno	0.75
Anhidrido ftálico	Naftaleno y aire	0.70
Polietileno de baja presión	Etileno y catalizador	0.65
Urea	Amoniaco y CO	0.70

Método 6. Capital fijo o de inversión fija.

Se basa en información publicada, acerca de la inversión fija promedio de plantas por unidad de capacidad anual; utilizando estos valores podemos obtener una aproximación de la inversión fija mediante la ecuación:

$$I_p = I_f \cdot P_a$$

donde: I_p = inversión fija
 I_f = inversión fija/ unidad de capacidad anual, %/(ton/año)
 P_a = producción anual, ton/año

Estos valores se encuentran publicados en tablas.

Método 7. De la tasa de retorno.

Este método se basa en el concepto de la tasa de retorno que es la relación del valor de ventas anuales a la inversión de capital; es una aproximación muy general que fundamentalmente se usa para medir lo atractivo de un negocio o empresa, y básicamente establece que una unidad monetaria de inversión de capital debe producir una unidad monetaria en valor de ventas anuales:

$$\text{Tasa de retorno} = \frac{\text{Valor de ventas anuales}}{\text{Inversión de capital}}$$

$$I_p = S V_a / T \quad \text{donde: } I_p = \text{inversión fija}$$

$S = \text{valor de ventas por unidad de producción.}$
 $V_a = \text{producción anual.}$
 $T = \text{tasa de retorno.}$

Se utiliza con los siguientes criterios:

- 1.- Las tasas de retorno de uno o mayores generalmente se aplican a uno de los siguientes tipos de plantas o procesos:
 - Transformación física.
 - Subproductos.
 - Operaciones donde la materia prima representa la mayor parte del costo de fabricación.
 - Requerimientos de gran cantidad de mano de obra o altos riesgos.
- 2.- Las tasas de retorno menores de uno, se encuentran en productos de gran volumen, productos intermedios de mercado estable, normalmente fabricación de materias primas muy elementales o básicas.

Método 8. De los índices de costo.

Los índices de costo muestran la tendencia en los costos y la economía de una empresa. Son parecidos a los índices económicos, y son los índices específicos que reflejan la actividad industrial (eléctrica, de construcción, química, etc.) y se componen como un conjunto de la actividad industrial.

Existen Indices particulares para cada industria: los Indices registran una base dada.

$$\text{Costo año B} = \text{Costo año A} (\text{Indice B} / \text{Indice A})$$

Esta relación es válida solamente para la misma capacidad, diferente año. No debe utilizarse, para un periodo mayor de 10 años, de no ser así la precisión del método se pierde, sin embargo con altas inflaciones solo se puede utilizar entre los 5 ó 6 años.

Existen varios Indices de costo, son de los que disponemos en la literatura, y los más conocidos son:

- Engineering News Record (ENR) (Construcción)
- Chemical Engineering Plant Cost. Index.
- Marshall and Stevens Equipment. Cost Index.
- Nelson Refinery Construction Cost Index.
- El mercado de valores. Nacional financiera- Semanal
- El estado de la situación económica. Banamex-Mensual
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática

Estimación del costo del equipo de proceso.

El componente más importante de una planta física, es el equipo de proceso, de ahí la importancia de obtener una estimación de este. Existen diferentes métodos para calcular el costo del equipo de proceso y a continuación se presentan.

Método 1. De las 6 décimas.

$$E_B = E_A (C_B / C_A)^f \quad \text{donde: } E_B = \text{Costo del equipo B}$$

$C = \text{Capacidad del equipo}$

$E = \text{Costo de compra del equipo}$

Exponentes típicos para equipos de proceso.

DESCRIPCION	EXPONENTE (f)
Calentador u horno a fuego directo	0.85
Torres fraccionadoras	0.73
Torres empacadas	0.65
Recipientes verticales	0.65
Recipientes horizontales	0.60
Tanques atmosféricos	0.30

Esteras de almacenamiento	0.70
Secadores	0.60
Filtros	0.53
Cambiadores de calor	0.60
Bombas centrifugas con motor	0.52
Bombas centrifugas con turbina	0.55
Bombas reciprocantes	0.70
Compresores de gas	0.82
Compresores de aire	0.28
Calderas	0.50
Torres de enfriamiento	0.60
Cristalizadores	0.65
Sopladores y ventiladores	0.68
Filtros prensa	0.58
Secadores rotatorios	0.63
Evaporadores tipo forzado	0.70
Evaporadores de tubos verticales	0.53
Evaporadores de tubos horizontales	0.55
Tolvas	0.85
Fulverizadores	0.35
Molinos de bolas	0.65
Enfriadores por aire	0.80
Agitadores	0.50
Sopladores	0.65
Compresores reciprocantes y centrifugos.	0.75
Transportadores	0.70
Secadores	0.50
Eyectores (hasta 5 etapas)	0.50
Calentadores	0.60
Unidades de refrigeración	0.75

Este método no debe usarse para una capacidad mayor a diez veces.

Método 2. De los índices.

Este método nos proporciona información preliminar; no debe utilizarse en lapsos de tiempo muy grandes (mayores a 5 años). El valor de los índices se encuentra publicado, en los índices de costo más conocidos.

$Ex = Ey (Nx/Ny)$ donde: Ex : costo de compra del equipo para el año x
 Ey : costo de compra del equipo para el año y
 Nx : valor del índice para el año x
 Ny : valor del índice para el año y

El metodo de las seis decimas y el de los indices, los podemos combinar, para calcular, tanto el costo para equipo de proceso como para la inversion fija, por medio de la siguiente relacion:

$$C \begin{cases} N_A \neq N_B \\ A = B \end{cases} = C (A/B)^F (I_B/I_A)$$

Metodo 3. Gráficas de costos de equipo.

Se utilizan gráficas en las cuales el costo es una función de las características del equipo y del equipo mismo, así tenemos que, para una bomba por ejemplo, el costo dependerá del material de que este hecha, presión que debe soportar, etc. y su vez será diferente a otro tipo de equipo, por ejemplo un cambiador de calor.

Metodo 4. Cotización directa.

Consiste principalmente en obtener los precios del equipo, directamente con el fabricante. La recopilación de precios deberá hacerse con el mayor número posible de fabricantes, para así poder realizar una buena comparación y adquirir el equipo con el fabricante que más nos convenga.

Capital de operación o de trabajo.

El capital de operación se puede definir como los fondos necesarios para la conducción normal de la empresa, en general el capital de operación es alrededor del 10% al 15% de la inversión total, o bien, del orden del 25% del valor de venta del producto anual.

El capital de operación incluye el valor de las materias primas, el inventario en procesamiento, el inventario de producto, las extensiones de crédito y los fondos necesarios para el pago de salarios y otros gastos.

Estimado del capital de operación.

Inventario de materia prima.....	\$ _____
Inventario en proceso.....	\$ _____
Inventario de producto.....	\$ _____
Extensiones de crédito.....	\$ _____
Fondos necesarios.....	\$ _____

Capital de operación =	\$ _____

Inventario de materia prima.

Las existencias de materias primas requeridas para la fabricación se controlan por los requerimientos de la velocidad de consumo dependiendo del proceso, por su valor, disponibilidad, fuentes de suministro y facilidades de almacenamiento.

Para propósitos de estimación se puede utilizar el suministro correspondiente a un mes equivalente a su valor de compra a precios del mercado.

Inventario en proceso.

En el proceso de producción el valor del inventario va a depender del tiempo total del ciclo de procesamiento. Este inventario se puede estimar como la mitad del gasto de fabricación total, que se presenta durante un período equivalente al tiempo total de retención o paro requerido para el procesamiento.

Inventario de producto.

La cantidad del inventario de producto que debe mantenerse varía considerablemente con el tipo de producto. En ausencia de datos específicos, el inventario de producto se puede suponer igual a la producción de un mes valuado al costo de fabricación.

Extensiones de crédito.

Debemos disponer de suficiente capital, para cubrir cuentas pendientes, para el pago de mercancía entregada a los clientes. Se puede estimar como la producción de un mes al valor de venta o al doble del costo de fabricación.

Fondos necesarios.

Estos son el capital necesario para el pago de salarios y para servicios y materiales de consumo; estos fondos necesarios pueden aproximarse a un mes de gastos de fabricación.

$$I_w = C_m (m + 4M + 0.5MQ)$$

donde: I_w : capital de operación

C_m : capacidad de operación mensual.

m : costo de materia prima por unidad de producción.

Q : ciclo de producción, meses.

M : costo de fabricación por unidad de producción.

Influencia del diseño en el costo del equipo.

Factores que influyen en el costo del equipo:

- (1).- Bases de diseño.
- (2).- Políticas de trabajo de la compañía.
- (3).- Requerimientos del cliente.
- (4).- Criterios de diseño y sobrediseño.
- (5).- Selección de materiales.

Bases de diseño.

Son un documento fundamental para desarrollar un proyecto de cualquier naturaleza, que describe en que consiste el proyecto, capacidad, tipo de proyecto, ampliaciones futuras, servicios, localización, producto, especificaciones de las materias primas, etc. A veces incluyen ciertas bases que hacen que el equipo sea de un costo mayor.

Dentro de las bases de diseño se encuentran los criterios para seleccionar materiales, requerimientos del cliente y criterios de diseño y sobrediseño.

Políticas de trabajo.

Normalmente las firmas de ingeniería son las que llevan a cabo el proyecto; sus procedimientos y normas deben ser exactos, y debe guardarse una copia de la memoria de cálculo; invariablemente toda estimación debe aprobarse por el director de la compañía.

Requerimientos del cliente.

Pueden ser muy variados, y fijarán sobre todo las bases de diseño.

Criterios de diseño y sobrediseño.

Pueden provenir tanto del cliente o por la compañía, para dar cierto margen de seguridad, por ejemplo se puede dar un porcentaje adicional sobre el valor calculado.

Selección de materiales.

Seleccionar un material dependerá del uso que se le dará y después de realizar el análisis conveniente se tomará el más económico y que a su vez satisfaga nuestras necesidades. Esto nos puede llevar a una economía de reemplazo.

Economía de reemplazo.

La economía de reemplazo significa que un proceso actual va a ser desplazado por otro más económico, así se puede reemplazar una política financiera, una fábrica, un proceso de fabricación, una máquina o una operación material por otra mejor.

Atraves de todo el proceso de la economía de reemplazo, en cada uno de los casos anteriores, cambian los medios más no las funciones. Por consiguiente todo problema de inversión en equipo es también un problema de reemplazamiento; y tenemos que tomar en cuenta 2 conceptos importantes: La amortización y la depreciación.

- Amortización, significa recuperar los fondos invertidos en un negocio o bien el costo de una inversión en bienes que pueden ser de diversa naturaleza. Tiene por efecto destinar, asignaciones periódicas de capital para recuperar un fondo que permita reemplazar un bien o servicio.

- Se entiende como depreciación, la disminución del valor o precio de un bien. En la economía se dice que es la disminución del valor que sufre el capital productivo, fundamentalmente por dos causas: físicas y funcionales.

* Causas físicas.- Cualquier bien nuevo tiene un valor en el mercado, pero al usarlo sufre depreciación (baja su valor) debido a: su uso, desgaste, corrosión, deterioro, accidentes.

* Causas funcionales.- Una de las causas funcionales más importante es la obsolescencia, ya que :

- a) Puede haber cambios por requerimientos por parte del gobierno o autoridad.
- b) Puede haber otras causas funcionales.

La depreciación se aplica a los bienes materiales, como a las no materiales, tales como la tecnología, marcas, patentes, gastos de organización, etc.

Existen ciertas reglas ya establecidas en cada país para el cálculo de la depreciación; así también existen algunos periodos de tiempo para cada tipo de bien, para calcular su depreciación. Por lo tanto la depreciación se calcula por la vida útil de cada equipo y existen tablas editadas por el gobierno.

Métodos para estimar la depreciación.

Para entender mejor los métodos de evaluación de la depreciación, a continuación se presentan algunas definiciones de los términos utilizados para tales fines:

- Valor original del bien.- Se define como el costo del equipo o la inversión actual del activo o bien.
- Valor de rescate.- Se define como el valor del bien al final de su vida útil.
- Vida útil de servicio.- Tiempo de servicio durante el cual el bien se utiliza en forma productiva.
- Vida útil económica.- Es aquel período de tiempo que se usa para propósitos de depreciar el equipo, de acuerdo con los períodos establecidos por la ley.
- Vida contable.- Es aquella depreciación que se calcula hasta la disposición o retiro del equipo, después de cumplir varios servicios degradados.

Metodo 1. Depreciación en línea recta.

El valor original del activo o bien, menos el valor de rescate, se deprecia en cantidades anuales iguales a lo largo de la vida útil de servicio. Consiste en:

- (1).- Diferenciar costo original y valor de rescate.
- (2).- Dividir el valor anterior entre la vida útil.

$$d = (I - Sv) / n = \%/año \quad \text{donde: } d: \text{depreciación anual}$$

I: inversión total al principio, costo original.
n: vida útil de servicio
Sv: Valor de rescate al final

AÑO	DEPRECIACION ANUAL	DEPRECIACION ACUMULADA	VALOR DEL BIEN AL FINAL DEL AÑO	RECUPERACION %
1	$d_1 = (I - Sv) / n$	d_1	$C_1 = (C_0 - d_1)$	$(d_1 / I) 100$
2	$d_2 = d_1$	$d_1 + d_2$	$C_2 = C_1 - d_2$	$(d_1 + d_2) / I 100$
n	$d_n = d_1 = d_2$	$\sum_1^n d_n$	$C_n = C_{n-1} - d_n$	

Método 2. Doble tasa y saldo decreciente.

En este método el doble de la tasa de depreciación en línea recta, se aplica anualmente al costo no recuperado, sin tomar en cuenta el valor de rescate.

El costo no recuperado se reduce por la depreciación del año previo, este método va a permitir una recuperación más rápida para la depreciación, en particular para los primeros años de vida del bien. Consiste en:

- (1).- Establecer el costo original, C_0
- (2).- La depreciación en el primer año se calcula multiplicando el costo original por el doble de la tasa anual.

$$T_a = (1/n) \cdot 100 \quad \text{donde: } n: \text{ número de años} \\ T_a: \text{ tasa anual } \%$$

$$\text{Doble tasa: } T_2 = 2T_a = (2/n)$$

AÑO	DEPRECIACION	COSTO NO RECUPERADO
1	$d_1 = C_0 T_2$	
2	$d_2 = C_1 T_2$ $d_2 = C_0(1-T_2)T_2$	$C_1 = C_0 - C_0 T_2$
3	$d_3 = C_2 T_2$ $d_3 = C_1(1-T_2)T_2$	$C_2 = C_1 - C_1 T_2$
n	$d_n = C_{n-1} T_2$	$C_n = C_{n-1} - C_{n-1} T_2$

Método 3. Suma de los dígitos anuales.

En este método si se considera el valor de rescate del bien, permitiendo disminuir el valor original de dicho bien, hasta su valor de rescate, proporcionando una alta depreciación, durante los primeros años de vida del bien. El método es el siguiente:

- (1).- Determinar la suma de los números que represente la serie aritmética de uno hasta el año de vida útil del bien. $\sum n =$ suma de dígitos anuales.

(2).- Establecer fracciones para cada año como sigue:

- a) $1/\sum_{i=1}^n n$, $2/\sum_{i=1}^n n$, $3/\sum_{i=1}^n n$, ..., $n/\sum_{i=1}^n n$
- b) Para calcular la depreciación se empieza en orden inverso, usando el año n para la depreciación del año 1.

C_o : costo original

V_R : valor de rescate.

$f_1 = n/\sum_{i=1}^n n$. $f_2 = (n-1)/\sum_{i=1}^n n$, ...

AÑO	n	1
DEPRECIACION	$d_1 = f_1 (C_o - V_R)$	$d_n = f_n (C_o - V_R)$

El método de la suma de dígitos anuales al igual que el método de doble tasa y saldo decreciente nos permite una recuperación rápida sobre los primeros años. Esto lo podemos observar en la fig. 1, que representa gráficamente los tres métodos, antes mencionados para calcular la depreciación.

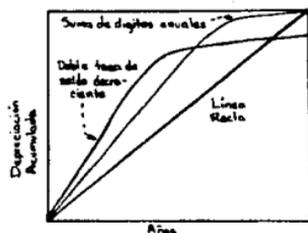


FIG.1.METODOS PARA CALCULAR LA DEPRECIACION.

Costos de operación o de producción.

A continuación se presenta un listado en el cual se incluyen todos los conceptos que dan lugar a los costos de fabricación:

A.- Costos directos de fabricación

Materias primas.....	\$-----
Mano de obra.....	\$-----
Supervisión.....	\$-----
Mantenimiento.....	\$-----
Suministros de planta.....	\$-----
Patentes y regalías.....	\$-----
Servicios auxiliares.....	\$-----

B.- Costos indirectos de fabricación	
Nómina.....	\$-----
Laboratorio.....	\$-----
Gastos de planta.....	\$-----
Empaque.....	\$-----
Embarque.....	\$-----

C.- Costos Fijos de fabricación	
Depreciación.....	\$-----
Impuestos sobre la propiedad.....	\$-----
Seguros.....	\$-----

Costos de fabricación = A + B + C

D.- Gastos generales	
Administración.....	\$-----
Ventas.....	\$-----
Investigación y desarrollo.....	\$-----
Financiamiento.....	\$-----

Costos de Fabricación + Gastos Generales + Ganancia Bruta = Costo Total del producto.

Modelo de flujo de efectivo.

Factores que afectan la inversión y los costos de producción:

- Fuentes de suministro de equipo. Si ocupamos equipo estándar reducimos el costo del mismo.
- Fluctuaciones de precios. Es necesario estar actualizado en este aspecto, para poder hacer una buena estimación.
- Políticas de la compañía. Hay que observar los reglamentos de seguridad, y también afectan los procedimientos de contabilidad, el método de depreciación utilizado, sindicatos de obreros, etc.
- Tiempo de operación y capacidad de producción. Equipo que este ocioso, aumenta el costo de mano de obra; programas de mantenimiento de preferencia en el mínimo tiempo; procurar trabajar al 100% de capacidad, dependiendo del diseño; en general mejorar en todo lo posible la operación.

- Políticas gubernamentales. Tarifas sobre importaciones o exportaciones; restricciones sobre la rapidez de la depreciación; variantes en las leyes de impuestos o de ingresos, etc.

Análisis de equilibrio.

Es una representación gráfica, matemática o tabular sobre la relación entre los ingresos totales de una empresa y su costo total, y todo esto se hace conforme cambia la producción.

Cuando se alcanza el equilibrio, es el momento en el cual los ingresos son iguales a los egresos. El punto de equilibrio, es el volumen de producción con el cual el ingreso total es igual a los costos totales, que a su vez es igual a la suma de los costos fijo y los variables (que son función de la producción):

$$TC = TR \text{ en el equilibrio.}$$

donde: TR : Ingreso total
TC : Costo total

Método matemático.

En el punto de equilibrio la empresa no pierde, pero tampoco gana:

$$TR = PX \quad \text{donde: } P: \text{ precio de venta por unidad} \\ X: \text{ núm. total de unidades vendidas}$$

$$TC = VC + FC \quad \text{donde: } VC: \text{ costo variable por unidad} \\ FC: \text{ costos fijos totales}$$

Por lo tanto en el punto de equilibrio:

$$Fe = FC / (P - VC)$$

El punto de equilibrio es la producción en la cual los ingresos totales son iguales a los costos totales. La fig.2. muestra la gráfica para el punto de equilibrio.

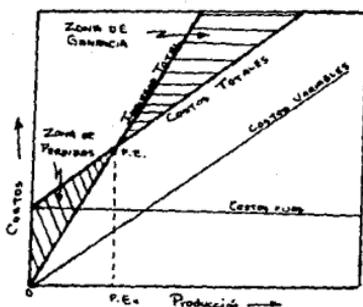


FIG.2. ESQUEMA PARA EL PUNTO DE EQUILIBRIO.

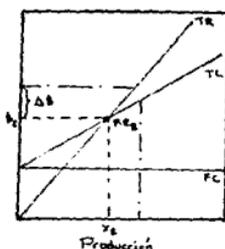
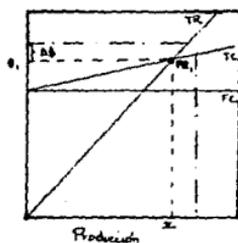
Método tabular.

Unidades vendidas	Costo Fijo.	Costo Variable	Costo Total	Ingreso Total	Utilidad o Pérdida
----	----	----	----	----	----
----	----	----	----	----	0 ← P _e
----	----	----	----	----	----
----	----	----	----	----	----

* Las pérdidas se ponen entre paréntesis.

Método gráfico.

A continuación se presentan dos gráficas en las cuales se muestran dos casos diferentes, el punto de equilibrio será aquel en el cual se interseccionan las líneas del ingreso total y costo total, respectivamente:



Ganancias.

$$\begin{aligned} GB &= TR - TC && \text{donde: } GB = \text{ganancia bruta} \\ GB &= x(P-VC) - FC && \text{donde: } x = \text{producción en el equilibrio} \\ GN &= GB - \text{Impuesto} && \text{donde: } GN = \text{ganancia neta} \end{aligned}$$

Si el impuesto es un porcentaje de la ganancia bruta:

$$\text{Impuesto} = \%GB = tGB \quad \text{donde: } t = \text{tasa de impuesto decimal}$$

$$\begin{aligned} \text{por lo tanto:} \quad GN &= (1-t)GB \\ GN &= (1-t) [x(P-VC) - FC] \end{aligned}$$

Análisis del costo máximo.

Condiciones óptimas de diseño.

Un diseño se basa en las mejores condiciones o en las más favorables. En cualquier caso, estas condiciones se van a reducir en el último análisis, en una relación de pérdidas y ganancias.

Un diseño óptimo puede basarse en condiciones que proporcionen el menor costo por unidad de tiempo o máxima ganancia por unidad de producción. De la combinación de las condiciones anteriores obtendremos algo mejor.

Al cambiar la variable de diseño, algunos costos aumentan y otros disminuyen. Así el costo total va a pasar por un mínimo y este valor se considera como óptimo.

Procedimiento con una variable.

Costos fijos (costos indirectos): $C_f(x) = a + b$

Costos variables (costos directos): $C_d(x) = c/x + d$

Costo total variable: $C_T = C_f(x) + C_d(x)$

En el punto óptimo la pendiente de $C_T = 0$ y $x = \sqrt{c/a}$
estas son las condiciones óptimas de diseño.

CONCEPTOS CONTABLES Y ESTADOS FINANCIEROS.

La administración de una empresa es aquella área que lleva la marcha de la misma, toda empresa necesita una administración, si esta es buena, será buena también la empresa y viceversa.

La contabilidad no solo es un servicio de información de la administración, sino que es parte de ella, ya que ayuda a reunir los estimados de presupuestos y datos para un plan futuro. La información de contabilidad es una herramienta asesora, que nos da información específica que a su vez utilizamos según convenga.

La contabilidad tiene diferentes funciones:

a) Elaboración de información financiera.- Esta información se presenta en documentos llamados "estados financieros", los cuales, son una radiografía del estado financiero de una empresa, estos estados son generalmente tres:

- 1.- Balance general.
- 2.- Estado de resultados (Pérdidas y ganancias).
- 3.- Estado de cambios en situación financiera o estado de origen y aplicación de recursos.

b) Revisión de la información financiera, auditorías. Estas auditorías pueden ser internas o externas. La auditoría interna se refiere a la supervisión de los sistemas implantados y a la revisión de los estados financieros por personal propio de la empresa; no todas las empresas cuentan con este sistema de auditoría interna y dan origen a las auditorías gubernamentales. La auditoría externa, es la ejecución de las mismas actividades de la interna, pero por personal ajeno a la empresa.

c) Análisis e interpretación de la información financiera. Los puntos anteriores no satisfacen las necesidades, solo hasta que estas se analicen y se interpreten para tomar decisiones para mejorar el sistema de la empresa. La interpretación de los estados financieros requiere un alto grado de conocimientos y experiencia, para tomar una buena decisión.

Balance General.

Todas las empresas comerciales, industrias, individuos, entidades, por una u otra causa ven modificados sus recursos si compran mercancías al contado, y modifican otros recursos, es decir, algunos recursos suben y otros bajan.

Al comprar intercambiamos recursos. Todas las empresas, cualquiera que sea su giro, cuentan con recursos o efectúan operaciones que, en una u otra forma los afecta.

El balance general es un listado de los recursos de una entidad, junto con las propiedades y los intereses de los acreedores y de los dueños de esos recursos. Es un estado de la posición financiera de una empresa, en una fecha determinada y refleja el resultado de todas las transacciones contables registradas desde la formación de la empresa.

Existe un período de tiempo para fijar la fecha de información, que generalmente es de un año contable. En algunas empresas este balance general se acomoda según convenga.

Se puede decir que el balance general, es un estado estático de la empresa.

Elementos esenciales del balance general.

Los principales elementos del balance general son los recursos y fuentes, que a su vez se dividen en obligaciones y recursos propios. Estos elementos tienen un nombre propio en el lenguaje de la contabilidad y son:

Recursos	----->	Activo
Obligaciones	----->	Pasivo
Recursos propios	----->	Capital

Identidad fundamental del balance general:

$$\text{Activo (A)} = \text{Pasivo (P)} + \text{Capital (C)}$$

Conceptos clasificados en el activo.

El activo puede dividirse en dos partes: el activo circulante y el activo no circulante.

El activo circulante, incluye aquellos recursos que a parte del efectivo se puedan tener disponibles, en un período de un año o menor (faciles de convertirse en efectivo en el período). Por ejemplo: Caja, bancos, clientes, deudores, documentos por cobrar y almacén. Normalmente se cobran, se venden o usan en el período.

El activo no circulante, incluye todos aquellos recursos no clasificados dentro del activo circulante, y que en consecuencia corresponden a los artículos que se pueden convertir en efectivo en un periodo mayor a un año. Por ejemplo: Edificios, equipo de transporte y de planta, valores, inversiones en general, cuentas por cobrar a largo plazo, inversiones permanentes y un concepto que se maneja como intangibles o activo diferido.

Dentro del activo diferido, podemos encontrar a su vez, patentes, marcas, crédito mercantil, concesiones, adelantos a ejecutivos, etc.

Otro concepto que se maneja dentro del activo no circulante, son los cargos diferidos, y podemos incluir en este los gastos de organización e instalación.

Conceptos clasificados en el pasivo.

El pasivo se divide en dos partes: a corto plazo y a largo plazo.

De manera similar al activo, el pasivo a corto plazo incluye todos aquellos conceptos que se tenga la obligación de pagar dentro de un año, debe contarse a partir de la fecha a la cual se refiere el balance general. Los conceptos que incluye son proveedores, acreedores, impuestos por pagar, documentos por pagar y otros gastos.

En el pasivo a largo plazo se incluyen todas aquellas obligaciones, con el compromiso de liquidarse a un plazo mayor de un año, tomando como base la fecha del balance general. Los conceptos que incluye son: Préstamos, hipotecas, financiamiento (deuda interna).

Conceptos clasificados en el capital.

El capital lo podemos estructurar como: Capital social (capital inicial) y Utilidades o pérdidas acumuladas.

El capital social, es con el cual se inicia una empresa, y es la suma de lo que aporten los inversionistas.

El capital se maneja normalmente como capital contable, y está formado por el capital social aportado por los accionistas; más aumentos de capital en la historia de la empresa (en el tiempo), ya sea por nuevos accionistas o por medio de la capitalización del super-hábit (ganancias); o por reevaluación de inventarios o también por utilidades de ejercicios anteriores. También se adiciona la reserva legal y es aquella que se forma separando el 5% hasta completar el 30% del capital social.

Estado de resultados o de perdidas y ganancias.

Mientras el balance general nos informa en un determinada fecha, el estado de resultados nos informa el origen de la utilidad o de la pérdida que se refleja en el balance general.

Nos informa de los conceptos que aumentan y los que disminuyen el capital. Es un modelo dinámico a diferencia del modelo estático del balance general, en donde los elementos básicos pueden analizarse en la gráfica del punto de equilibrio, y se presenta en términos generales como sigue:

Ventas Brutas
- Devoluciones y otros conceptos.

Ventas Netas
- Costo de Producción.

Utilidad de Operación
- Gastos de Admón., Ventas y Financiamiento

Utilidad Bruta (antes de impuestos)
- Impuesto sobre la renta.
- Pago a trabajadores.

Utilidad Neta
- Dividendos pagados a acciones comunes.

Adición (Reducción) de capital o Ganancias Retenidas

Una reducción de capital nos lleva a perdidas y una adición de capital a utilidades y ganancias.

Estado de cambios en situación financiera o de origen y aplicación de recursos.

El objeto de este estado es unir dos balances generales consecutivos de una empresa, con el objeto de determinar la captación de recursos y aplicación de los mismos, con el fin de conocer las variaciones positivas y/o negativas de los excedentes de efectivo.

Origen de recursos.- Se llama así a todas aquellas disminuciones de los activos de una empresa o bien los aumentos de pasivos y capital.

Aplicación de recursos.- Se llama a los aumentos de activos o bien a las disminuciones de pasivo y capital.

Orígenes - Aplicaciones = Variaciones Finales.

Análisis e interpretación de estados financieros.

Existen dos tipos de análisis:

- * Análisis vertical.- En el caso del balance general consiste en lo siguiente:
 - Se da el valor de 100 a la suma total de los activos.
 - Posteriormente se calculan los porcentajes parciales de cada uno de los elementos que constituyen la sumatoria de los activos. Esto mismo se aplica a los pasivos y el capital.
 - Se comparan con los de industrias similares, principalmente aquellas consideradas como modelo y que se cotizan en la bolsa.

En el caso del estado de resultados el análisis vertical se realiza tomando como base a las ventas netas como 100% y se procede igual que en el balance general a calcular y comparar los porcentajes de cada uno de los elementos.

* Metodo de las Razones o relaciones simples:

1ª Razón.- Se conoce como prueba del ácido o como el índice de liquidez. Esta es la relación que existe entre el activo de inmediata realización (circulante) y el pasivo circulante o a corto plazo. Esta es una prueba de balance de los acreedores, esto es, que el acreedor puede exigir su pago. Por lo anterior la relación estándar mínima debe ser igual a 1, si la relación es menor a 1 la empresa no tiene liquidez y podemos decir que opera con pérdidas.

2ª Razón.- Se denomina la razón de capital de trabajo y es la relación de activo a pasivo circulante. La relación normal debe ser de 2. 2 de activo por 1 de pasivo.

3ª Razón.- Es la relación de capital concreto entre el pasivo total, debe tener un valor mínimo de 1.

4a Razón.- Es la relación de capital contable entre el activo fijo neto, esta relación sin incluir las revaluaciones de activo es del orden de 1 (el activo fijo neto es el activo no circulante). Si fuera menor que uno el capital de los socios es muy pequeño con respecto a lo que se tiene, es decir la empresa es más de los acreedores.

5a Razón.- Es la rotación de cuentas por cobrar y se obtiene dividiendo las ventas netas entre los saldos promedio de cuentas por cobrar, y se expresa posteriormente en número de días, que representan el aumento en tiempo de las cuentas por cobrar correspondientes a las ventas. Si es muy grande representa que es mucho tiempo para cobrar, y significa que podemos tener falta de liquidez porque no tenemos ingreso. El orden es de 15 días máximo.

6a Razón.- Es la rotación de planta y equipo, este índice se obtiene dividiendo las ventas netas entre la inversión en inmuebles, planta y equipo. Esta relación no tiene límite; puede señalarse como mínimo 1.5 ó 2, esto significa que producen más de lo que venden.

7a Razón.- Es la rotación de capital contable, es similar a la anterior ya que se refiere a la relación de ventas a capital contable, y su valor mínimo es de 1.5, esto significa que el capital contable esta produciendo.

Otro tipo de relaciones son las llamadas rentabilidades, que equivalen al rendimiento de la empresa. Son tres y se expresan en porcentajes:

1a Razón de utilidad por ventas = la Utilidad Neta entre ventas netas $\times 100$. Si es muy baja la relación significa que los costos son muy altos. El valor depende del tipo de industria, en promedio se establece un mínimo de 7%.

2a Rendimiento real, se refiere al rendimiento real para los accionistas y es la relación entre la utilidad neta y el capital social $\times 100$. Este valor debe ser competitivo con cualquier valor del mercado (con el costo de los capitales).

3a Rendimiento Bruto de los accionistas, es la utilidad neta entre el capital contable $\times 100$, y es menor que el anterior.

Existe otra relación que es muy utilizada, manejada como ROI (retorno sobre la inversión), y es la relación de la utilidad neta entre la inversión en planta y equipo $\times 100$, expresada en años.

Evaluación de proyectos de inversión.

Los métodos para la evaluación se basan en el concepto del valor del dinero en el tiempo.

Método 1. Método del valor presente.

$$F = P (1+i)^n \quad \text{donde: } \begin{array}{l} F: \text{Cantidad futura} \\ P: \text{Cantidad presente} \\ i: \text{Tasa de interés} \\ \quad \text{compuesto anual.} \\ n: \text{Número de años.} \end{array}$$

Método 2. Método Series de valor presente.

$$P = R \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad \text{donde: } \begin{array}{l} R: \text{Pagos anuales uniformes} \\ \quad \text{al final del periodo o} \\ \quad \text{año.} \end{array}$$

Método 3. Recuperación de Capital.

$$R = P \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right]$$

Método 4. Series de interés compuesto o anualidad (combinación de los métodos 1 y 3)

$$F = R \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i} \right] \quad \text{Represente la cantidad futura de las} \\ \text{anualidades } R \text{ en } n \text{ periodos a una} \\ \text{tasa } i.$$

Metodo 5. Fondo de amortización.

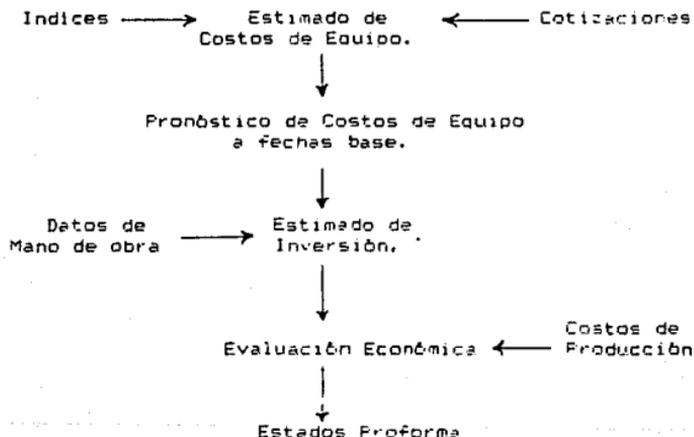
$$R = F \left[\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right] \text{ Cuando tenemos que pagar anualmente a esta tasa de interés.}$$

Forma de efectuar la evaluación.

Estados Proforma.- Son la expresión de balances generales con conceptos generales del estado de resultados. Simulan en el tiempo lo que va a ser el proyecto (rendimiento del proyecto), con esto podemos decir si el proyecto será o no rentable.

El tiempo en años sobre el cual se proyecta, se le llama horizonte del proyecto y se hace en un mínimo de 10 años.

EVALUACIONES DE INVERSION.



Valor del dinero en el tiempo.

Cuando se presta dinero, se corre el riesgo de que este no sea recuperado. Una suma de dinero llamada interés es el incentivo ofrecido para hacer ese riesgo aceptable. Cuando recibimos un préstamo, el interés se paga por usar el dinero en un período de tiempo.

Sin embargo, el valor futuro del dinero, F , es diferente al valor presente, P . Las relaciones entre F y P dependerán del tipo de interés usado.

Interés simple.

Cuando se usa un interés simple, F y P son relacionados por: $F = P(1+ni)$ donde i es la tasa de interés fraccional, y n es el número de períodos de interés. Normalmente, el período de interés es un año, en tal caso es conocido como la tasa de interés efectiva.

Interés compuesto anual.

El interés compuesto anual es más comúnmente usado, donde F y P se relacionan por: $F = P(1+i)^n$ ó $F = P f_d^{-1}$, donde el factor de interés compuesto, f_d , es: $f_d = (1+i)^n$.

El valor presente, P , de una suma futura de dinero, F es: $P = F/(1+i)^n$ ó $P = F f_d$, donde el factor de descuento, f_d , es: $f_d = 1/f_d = 1/(1+i)^n$.

Para el caso de tener una tasa de interés fraccional diferente en cada año tenemos que: $F = P(1+i_1)(1+i_2)\dots(1+i_n)$

Interés compuesto para un intervalo corto.

Si el pago de intereses se hace m veces por año a un interés compuesto, se requieren mn pagos en n años. Una tasa de interés anual nominal, i' , se puede definir como:

$$F = P \left(1 + \frac{i'}{m}\right)^{mn}$$

En este caso, el interés anual efectivo, i , es: $i = \left(1 + \frac{i'}{m}\right)^m - 1$

En el límite (m se aproxima a infinito), tales pagos pueden considerarse para un pago infinitesimal, en tal caso el interés se dice que es compuesto continuo.

Interés compuesto continuo.

Si expandemos la ecuación para F en el interés compuesto para un intervalo corto, obtenemos:

$$F = P \left[1 + m \left(\frac{i'}{m}\right) + \frac{m(m-1)}{1 \cdot 2} \left(\frac{i'}{m}\right)^2 + \frac{m(m-1)(m-2)}{1 \cdot 2 \cdot 3} \left(\frac{i'}{m}\right)^3 + \dots \right]^n$$

Como m se aproxima a infinito, el intervalo de tiempo entre los pagos es muy pequeño, y en el límite se reduce a:

$$F = P \left(1 + i + \frac{(i)^2}{2!} + \frac{(i)^3}{3!} + \dots \right)^n \quad \text{o} \quad F = P \exp(i n)$$

Comparando el interés compuesto anual y este último, vemos que la tasa de interés nominal anual, i' , se relaciona a la tasa de interés anual efectiva, i , por:

$$i' = \log_e(1+i) = 2.3 \log_{10}(1+i)$$

y de aquí, $i' < i$.

Esto es algunas veces discutible, el interés compuesto continuo representa una situación real, más correcta que el interés anual compuesto. Normalmente, la diferencia entre el interés compuesto anual y el continuo es pequeña, sin embargo puede ser una cantidad significativa cuando manejamos grandes cantidades de dinero.

CAPITULO II

COORDINACION DEL AREA CIVIL.

En este capítulo esperamos que el ingeniero químico se familiarice con las bases de ingeniería de estructuras. Esto le permitirá hacer la transición de un diagrama de flujo o tubería e instrumentación, a la obtención de la estructura final de un proyecto.

La ingeniería estructural esencialmente investiga y diseña resistencias a las fuerzas y soportes de carga en miembros estructurales. Esto incluye los cimientos, muros, columnas, vigas, apuntalados y armazones para construcción, estructuras o soportes de equipos.

FUERZAS, CARGAS Y ESFUERZOS.

Aquí se definen los términos de carga, fuerza, y esfuerzos aplicados a materiales estructurales y componentes, y términos adicionales como compresión, tensión, cizallamiento, flexión y torsión.

Aunque los términos carga y fuerza pueden ser usados indistintamente, en el diseño de estructuras debe usarse el término carga; aquí usaremos ambos indistintamente.

Los términos de carga y fuerza pueden ser definidos como una acción de tiro o empuje sobre un cuerpo. Esta carga en un cuerpo puede ser concentrada en un punto, o distribuida a lo largo de una longitud o sobre una área de la superficie. Estas fuerzas alteran o tienden a alterar el estado del cuerpo del soporte.

Las unidades de carga son expresadas usualmente en sistema inglés como libras o miles de libras (llamadas kips). Prácticamente todos los libros, códigos y manuales industriales usados en el diseño estructural, son en unidades inglesas.

Hay varios tipos de cargas, como cargas muertas, cargas vivas, cargas de impacto, cargas sísmicas, cargas del viento y ciertas cargas de operación; cada tipo requiere un método particular de diseño.

Combinaciones de cargas.

Es necesario determinar los tipos de carga, el diseñador estructural debe decidir que combinación de cargas es más probable que ocurra a un tiempo. El diseñador usualmente se guía por los estándares escritos en los códigos de construcción. Las cargas debidas al viento, sismo o nevadas varían de acuerdo a la localización geográfica.

Clasificación de las cargas.

Las fuerzas actúan en un cuerpo en muchas formas y direcciones. Estas fuerzas son clasificadas de acuerdo a la manera de deformación de el cuerpo expuesto a estas. A continuación se dan definiciones de diferentes clases de cargas:

• Carga compresiva, es una fuerza que actuando en un cuerpo tiende a comprimirlo, como se muestra en la fig. 1a. Aquí una carga P está en la cima de la columna, mientras que la fuerza de oposición o reacción, R , está en el fondo de la columna. Uno de las normas básicas de la física y el diseño estructural es que la suma de las fuerzas debe ser igual a cero, para tener un equilibrio en el cuerpo. Por lo tanto, la reacción R , del fondo de la columna debe ser igual a la fuerza P , aplicada en la cima.

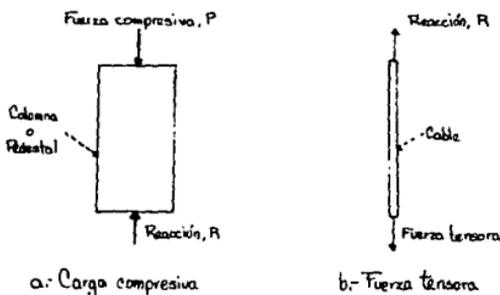


FIG.1. FUERZAS Y REACCIONES EN UNA ESTRUCTURA.

Una carga compresiva puede ser en alguna dirección, como en el caso de un puntal. La mayor diferencia entre una compresión de un miembro largo y un corto, es que el miembro largo es más probable que falle por pandeo que por rompimiento.

Ejemplos de miembros cortos son los pilares, pedestales y columnas. La proporción de la longitud al menor diámetro, l/d , del miembro a compresión es crítica, en cierta capacidad de soporte. La mayor proporción de l/d , da la menor de las cargas compresivas que el miembro puede sostener.

* Fuerzas tensoras, actúan sobre un cuerpo tendiendo a la elongación, como se muestra en la fig. 1b. La tensión ocurre cuando un miembro, como un cable, vara o un lazo, resisten esfuerzos en cada extremo. La proporción de longitud a diámetro tiene efectos muy pequeños sobre la capacidad.

* Cizallamiento, ocurre cuando dos fuerzas, casi en el mismo plano de acción, actúan una cerca de la otra, como se muestra en la fig. 2. Un ejemplo es un corte de lata, una hoja de acero, o un perno de acero que une dos placas que son tensionadas por separado.

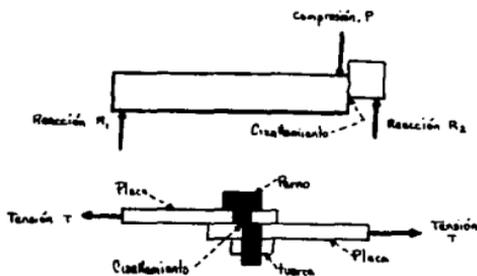


FIG. 2. CIZALLAMIENTO BAJO FUERZAS DE TENSION O COMPRESION.

* Flexión, es probablemente la fuerza o carga más importante sobre un miembro, como se muestra en la fig. 3a. La flexión es el acto de curvar o doblar un miembro estructural, esta curvatura ocurre cuando varias fuerzas tienen diferentes líneas de acción y dirección actuando en un cuerpo.

El producto de la magnitud de las fuerzas y la distancia perpendicular entre las fuerzas y el punto considerado, es llamado momentum, momento de flexión o momento de fuerza, y es considerado como la tendencia de una fuerza a causar rotación alrededor de un punto o eje. Las unidades dimensionales para expresar el momento de flexión pueden ser: in-lb, ft-lb, in-kips o ft-kips.

El momento de flexión es identificado como positivo o negativo para miembros estructurales horizontales, y en el sentido de las agujas del reloj y en el sentido opuesto a las agujas del reloj para otros miembros. Un momento positivo causará en un miembro horizontal una flexión cóncava hacia abajo. Algunos diseñadores llaman a un momento que es en el sentido de las agujas del reloj como positivo.

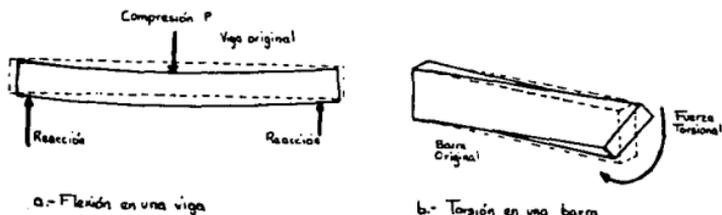


FIG.3. EFECTOS DE FLEXION O TORSION EN UNA ESTRUCTURA.

* Torsión es con otro tipo de cargas, que frecuentemente se encuentran más en maquinaria que en estructuras. Una fuerza torsional tiende a hacer girar un cuerpo, como se muestra en la fig.3b. La torsión es expresada en las mismas unidades que el momento de flexión.

Esfuerzos dentro de un cuerpo.

El termino de esfuerzo es muchas veces confundido con fuerza media. En diseño de estructuras, esfuerzo es definido como una fuerza sobre una unidad de área. Esta unidad de área es usualmente 1 pulgada cuadrada (puede usarse como base de diseño). El esfuerzo de tensión y el esfuerzo de cizallamiento son también expresados sobre una unidad de área de 1 in^2 .

El termino esfuerzo también significa la fuerza resistente o reacción del material, a la fuerza exterior. Puede ser definido como una fuerza interna ejercida por ambas partes adyacentes de un cuerpo, através de un plano imaginario de separación. El símbolo común que denota esfuerzo es σ , con un subíndice o exponente para indicar el tipo de esfuerzo.

El tipo de esfuerzo dentro de un cuerpo es directamente relacionado a el tipo de fuerza que actúa sobre el mismo; por lo tanto encontraremos esfuerzos compresivos, tensiones, de cizallamiento y de flexión. Mientras que los tres primeros son simples de determinar, el esfuerzo por flexión es muy complejo. Las fórmulas para los esfuerzos compresivos, de tensión y cizallamiento son:

$$f_c = F/A$$

$$f_t = T/A$$

$$f_v = V/A$$

donde f_c es el esfuerzo compresivo, f_t es el esfuerzo de tensión, f_v es esfuerzo de cizallamiento, P es carga compresiva, T es carga de tensión, V es carga de cizallamiento A es el área, in^2 .

El esfuerzo por flexión en un cuerpo no es uniforme, cuando un cuerpo tiende a curvarse, las fibras exteriores de los extremos se estiran al máximo, mientras que las fibras en el eje neutral del miembro tienen un esfuerzo de cero (ver fig.4). Por facilidad en los cálculos, supongamos que la distribución de esfuerzos es triangular en cada lado del eje neutral.

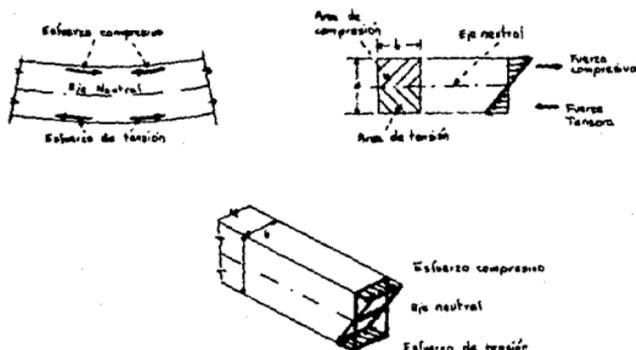


FIG.4 DISTRIBUCION DE ESFUERZOS POR TENSION DENTRO DE UN CUERPO NO UNIFORME.

El lado cóncavo del miembro tiende a acortarse, causando un esfuerzo compresivo, mientras el lado convexo tiende a alargarse, resultando un esfuerzo de tensión. Por lo tanto, una viga horizontal con una flexión positiva deberá tener un esfuerzo de compresión máximo en las fibras interiores y un esfuerzo de tensión máximo en las fibras exteriores del fondo o base.

El momento resistente del miembro deberá ser el resultado del par de fuerzas debido a la compresión y tensión. La fuerza compresiva total dentro de un cuerpo rectangular es la suma de todos los esfuerzos compresivos en el triángulo a través de el ancho del miembro. Lo mismo es correcto para la fuerza total de tensión, dentro del cuerpo.

Para determinar el esfuerzo máximo de las fibras de un miembro expuesto a fuerzas de flexión, debe determinarse una geometría específica (llamado momento de inercia, I) para la sección de carga de un cuerpo. Además, debe calcularse la distancia, c , del eje neutral de la sección de carga a las fibras exteriores. El esfuerzo máximo de las fibras puede ser determinado por:

$$f_{max} = Mc / I$$

Otras clases de esfuerzos.

Los tipos de esfuerzos usados en los códigos de construcción, manuales de diseño y por diseñadores de estructuras, son una área de posible confusión. Estos incluyen terminos como: último esfuerzo, esfuerzo producido, esfuerzo máximo permisible, y el esfuerzo de trabajo (algunos usan el termino "fuerza" en lugar de la palabra "esfuerzo"). A continuación se dan algunas breves definiciones de terminos importantes:

-Esfuerzo perjudicial, puede ser el último esfuerzo, es decir, el esfuerzo en el punto, en donde se produce una fractura en el material, en una súbita separación, o la completa destrucción de la conexión del material. Ocurre súbitamente si el material es quebradizo, o lento durante algún periodo de tiempo, si el material es dúctil.

- Esfuerzo permisible (o esfuerzo seguro de trabajo), es el esfuerzo permitido por el código regente. Las estructuras diseñadas de acuerdo con un código serán soportes seguros, para una carga dada o bajo una condición dada. El esfuerzo permisible es menor que el esfuerzo perjudicial. El margen entre el esfuerzo permisible y el esfuerzo perjudicial es el factor de seguridad.

- Esfuerzo permisible de trabajo para un miembro y material dado, dependerá de las características del material, y de la cantidad y clase de daño que podrán resultar en una falla. Un gran peligro, tendrá un factor de seguridad grande.

ra que los materiales usados en construcción son raramente probados para cada situación, el valor aproximado de la propiedad, deberá obtenerse por datos de pruebas en materiales similares.

- Esfuerzo producido (o punto producido) es el esfuerzo unitario, en el cual el material primero exhibe un incremento apreciable en su estiramiento, sin un incremento en el esfuerzo, o en el cual un material exhibe deformación permanente o fija. Si un material es sujeto a un esfuerzo menor a este esfuerzo producido, el material retornará a sus dimensiones originales, despues que el esfuerzo es relevado. Esto se conoce como el límite elástico, la elasticidad aparente o límite proporcional. Estas son razones, por lo que el esfuerzo permisible se establece en un valor más bajo que el esfuerzo último o producido. Otra razón es que la carga viva anticipada en una estructura es solamente estimada; durante la vida de la estructura, cargas vivas no planeadas pueden suceder y la carga viva usada para diseñar, representa una suposición basada en la experiencia de las agencias. Otra razón es que los materiales estructurales no son perfectamente uniformes, las propiedades de algunos cambian durante el servicio, por corrosión o fatiga. Estos factores determinan que esfuerzo permisible puede usarse para cada tipo de material y condición de carga.

Deformación de materiales.

El diagrama esfuerzo-estiramiento para cada material de construcción es el mejor indicador de las propiedades para ese material.

-Estiramiento.- Es definido como la deformación debida a fuerzas exteriores, y puede ser en forma de elongación, consolidación o movimiento lateral. La elongación es el incremento de la longitud de un miembro, debido a esfuerzos de tensión y el cambio total en la longitud es llamada estiramiento. El esfuerzo de cizallamiento puede tambien causar estiramiento.

-Deformación.- Es otro termino usado para estiramiento, y es el cambio en la forma de un miembro cuando se le aplican fuerzas.

-Deslizamiento.- Es una deformación que se incrementa con el tiempo, mientras sea constante el esfuerzo remanente. Este es causado por la deformación plástica o flujo de metales, y tiende a incrementarse a temperaturas altas.

- Relación de Poisson.- Es la relación de unidad de deformación en ángulo recto a la dirección de las cargas por la unidad de deformación en la dirección de la carga. Esta relación es usada en estructuras altamente complejas, y es ignorada en problemas simples.

Determinando las fuerzas exteriores en un miembro estructural, podemos mejorarlo por medio de los diagramas de carga. Estos diagramas suministran los datos adecuados para determinar el momento de flexión o cizallamiento, en algún punto de la viga, tanto como las reacciones en los soportes.

Estos valores constituyen las fuerzas exteriores que actúan en el miembro estructural, y sirven para seleccionar el tamaño del miembro, que soportará las fuerzas exteriores con seguridad.

PROPIEDADES GEOMETRICAS DE LAS FORMAS ESTRUCTURALES.

La fig.5 ilustra una construcción simple de acero para una planta de proceso químico, en la cual se identifican la mayor parte de los componentes. Las formas de la construcción incluyen columnas que soportan el techo apuntalado o vigas. Columnas interiores en los extremos de la construcción son llamadas columnas de viento, estas no sostienen el peso del techo pero soportan el entablado, y resisten las fuerzas del viento en los extremos del muro. El miembro horizontal de marco, en el muro, entre la columna que soporta el entablado se conoce como durmiente o viga. Los durmientes son usualmente espaciados 4 ó 6 ft, dependiendo de la intensidad del viento y la fuerza del entablado. Las barras verticales que impiden que los durmientes se pandeen son llamadas, barras de pandeo; estas son sujetas al miembro tope horizontal de el muro, conocidas como el puntal de alero.

Los miembros horizontales, soportados del techo apuntalados o vigas, son correas; estas son también espaciadas 4 ó 6 ft, dependiendo de las condiciones de carga del techo y el tipo de techado. Las vigas son usualmente hechas de canales de acero con el borde inclinado hacia abajo. Las vigas son también soportadas lateralmente por barras de pandeo, para evitar su pandeo; las barras sostienen una porción de la carga del techo.

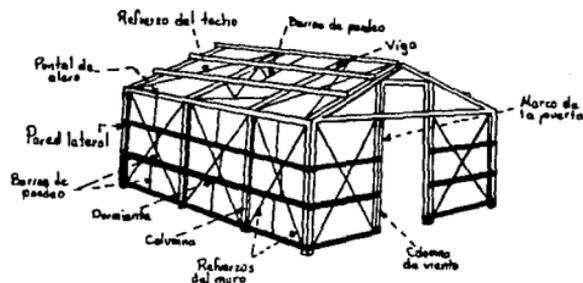


FIG. 5. COMPONENTES ESTRUCTURALES PARA UNA CONSTRUCCION SIMPLE DE ACERO.

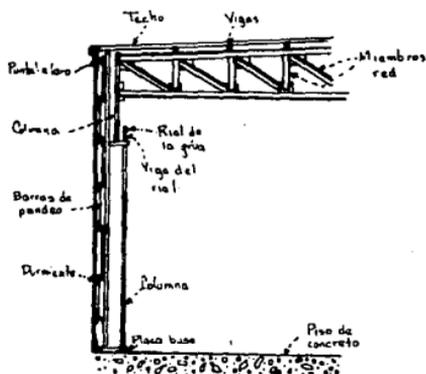


FIG. 6. SOPORTE ESTRUCTURAL PARA UNA GRUA

Los miembros de refuerzo diagonales en los muros son conocidos como refuerzos del muro, son similares en el plano del techo, pero llamados refuerzos del techo; estos consisten de barras de acero o ángulos.

Cuando se usa un techo apuntalado, se instalan otros refuerzos fijos, en el plano de la viga más baja de los apuntalados. Los miembros de compresión de algún refuerzo fijo, son llamados puntales.

Cuando una estructura contiene un puente horizontal, para el viaje de una grúa, el miembro que soporta el riel de la grúa es conocido como la viga riel. La fig. 6 muestra una sección de una construcción incorporando este último elemento.

Todos los sistemas estructurales, sean parte de una construcción o un puente transportador, tienen componentes que actúan como:

- Miembros de compresión.- Como columnas, postes, pilares, pedestales y puntales.
- Miembros de tensión.- Como cuerdas de alambre, varillas, refuerzos en ángulo, barras de refuerzo de concreto y barras de suspensión.
- Miembros de cisallamiento.- Como pernos, tornillos, soldaduras, clavos y remaches.
- Miembros de flexión.- Como vigas, durmientes y correas.
- Miembros torsionales.- Como flechas y otras partes de maquinaria.

Los componentes estructurales largos, como un puntal de techo o un puente transportador, pueden incluir diferentes miembros a los mencionados.

Cada componente tiene propiedades específicas de geometría y material, para la mejor resistencia a las fuerzas externas. Por experiencia, las fuerzas, el tamaño y la forma del miembro pueden ser fácilmente seleccionadas, para tener la menor cantidad de deformación y el menor costo.

Para calcular el esfuerzo dentro de un miembro cuando las fuerzas externas son conocidas, deben ser determinadas las propiedades y forma exactas.

Propiedades geométricas.

Las propiedades geométricas, como el área, momento de inercia y módulo de sección, pueden fácilmente calcularse para formas circulares y polígonos, estas propiedades podemos encontrarlas en tablas, las cuales se encuentran fácilmente en la bibliografía. Para formas roladas o forjadas en frío de acero, el cálculo es muy complejo, por ello los diseñadores prefieren confiar en las tablas de los manuales de acero.

Definiciones para las propiedades geométricas principales:

* Momento de inercia.- Es la suma de los productos obtenidos por la multiplicación de cada elemento de una área por el cuadrado de la distancia al eje neutral. El momento de inercia es descrito como la propiedad geométrica del área para una forma estructural, que es una indicación de su fuerza. Un momento de inercia es siempre dado con respecto a una línea dada, es decir, en un eje neutral, o la base de el área. La expresión para el momento de inercia es:

$$I = r^2 dA$$

donde r es el radio de giro alrededor del eje neutral y dA es una diferencial de área, que en la suma se convierte en la sección de carga a el área total, A .

* El módulo de sección.- También es conocido como factor de sección, es una medida del momento resistente, o fuerza, de una viga que tiene una sección de carga dada. Es implícitamente usado en el cálculo para el diseño de vigas. El módulo de sección es calculado por:

$$S = I/c$$

donde I es el momento de inercia para la forma alrededor del eje neutral, c es la distancia máxima al eje neutral de las fibras extremas de la forma.

Los componentes estructurales que resisten el cizallamiento son normalmente las conexiones, que pueden ser pernos, tornillos, clavos o pasadores. Las conexiones soldadas son las que principalmente resisten el cizallamiento. La característica dominante de diseño de conexiones es el área seccional de carga en el punto de máximo cizallamiento. El área neta en el origen de las fibras, en las conexiones con perno es el área crítica en cizallamiento.

Las formas seleccionadas para los miembros estructurales son gobernados por el tipo de carga. Una carga compresiva requiere un miembro formado simétricamente para evitar la excentricidad. La cantidad máxima de material debe ser distribuida tan lejos como sea posible del centro de gravedad de la forma.

Cuando no es posible una forma hueca, porque el tipo de material y método de manufactura, se requiere de una masa máxima y una simetría; la forma será curva, rectangular o poligonal, si el material es madera o concreto.

Cuando el miembro compresivo es hecho de acero, la forma es probable que sea similar a la letra H, como una viga de bordes anchos.

Cuando la longitud del miembro compresivo es corta, la propiedad significativa será el área seccional de carga. En la forma circular y rectangular es simple determinar el área; pero para formas de acero, el área debe ser obtenida de tablas en un manual o libro.

Cuando el miembro de compresión es susceptible a pandeo, se toman en cuenta dos propiedades, estas son la longitud no soportada del miembro, L , y el radio de giro alrededor de cada eje neutral. La longitud no soportada es también determinada por cada uno de los ejes. La resistencia al pandeo se incrementa inversamente con la proporción de L/d .

Las fórmulas para determinar las propiedades de las formas simples, incluyendo radio de giro, se encuentran junto con las tablas en las que se encuentran las propiedades geométricas de las formas.

Formas estructurales de acero.

Para la conveniencia de los usuarios de formas de acero, el American Institute of Steel Construction (AISC) tiene diseñado un sistema para señalar las formas roladas de acero con letras y números.

Por ejemplo, un ángulo típico de catetos iguales de 4 in que es de 8 ft de largo, es escrito como: $L4 \times 4 \times 1/4 \times 8' - 0''$. Aquí, L representa un ángulo, 4×4 dice que cada cateto es de 4 in de longitud, $1/4$ es el grueso del cateto, in, y $8' - 0''$ es la longitud total de la pieza. Si el ángulo tiene catetos de diferentes longitudes, el más largo se escribe primero, por ejemplo: $L6 \times 4 \times 1/4 \times 8' - 0''$.

Las formas comunes conocidas como vigas I y vigas H, son clasificadas como estándar (E), bordes anchos (W), misceláneas (M), junior (JR), y pilote-soporte (PF). Estas son escritas con la letra denotando la forma, seguida por una dimensión que es la diámetro de la forma en in, y finalmente un número representando el peso de la forma en lb por ft lineal. Cuando la longitud de un miembro es incluida, esta se anota en ft y in, siguiendo la descripción de la forma.

Muchas formas estructurales son forjadas por roiado en caliente y son también conocidas como formas de acero templado. Otras formas estructurales son forjadas en frío, estas son normalmente usadas para edificios de acero prefabricado. Las formas forjadas en frío son también usadas por economía en construcción, en miembros secundarios, como vigas, ángulos, correas o puntales.

Los principales miembros estructurales de edificios prefabricados son usualmente, hechos de placas de refuerzo de acero. Por economía, las formas rígidas, columnas y vigas son usualmente rematadas o terminadas en punta, a fin de que el momento de inercia de la sección se adapte al momento de flexión. Esto reduce el peso normalmente requerido para una sección rolada de profundidad constante.

CODIGOS DE CONSTRUCCION PARA PLANTAS DE PROCESO.

Diferentes códigos de edificios son usados, como el "Uniform Building Code", el "Standar Building Code", y el "Basic Building Code (BOCA)". Los códigos citados incluyen regulaciones, conductas para diseño estructural, tan buenos como muchos otros aspectos críticos para la construcción de plantas de procesos químicos. Otros códigos incluyen prevención de fuego, distribución eléctrica, tuberías y otros componentes vitales en construcción.

Estos códigos diseñan el tipo de construcción por varias clasificaciones: no combustible, combustible, resistente al fuego y no resistente al fuego. Cada clasificación es identificada por una letra y un número, que puede variar en los diferentes códigos.

Áreas de piso y cargas permisibles.

El máximo permisible de áreas de piso de edificios son gobernados por el grado de peligro de la ocupación y el grado de resistencia al fuego de la construcción. Por lo tanto, un edificio no combustible, resistente al fuego es permitido que tenga una área de piso de un combustible, y edificios no resistentes al fuego, se usarán para otras ocupaciones.

La regulación estructural de los códigos es dividida en dos secciones o capítulos: a) comportamiento con el mínimo permisible de carga para ser usado y b) el máximo esfuerzo permisible para cada tipo de material de construcción. Estos incluyen cargas vivas en el techo y pisos, y cargas laterales como las causadas por el viento y temblores. Los materiales de construcción, incluyen acero, concreto, mampostería, madera y materiales misceláneos, como plásticos y aluminio.

Las cargas vivas se suponen en el diseño de edificios y estructuras, y son las cargas mayores que probablemente serán producidas por el propósito de la ocupación, pero en caso de no ser así, no serán menores que la mínima carga requerida por el código.

Las cargas pueden ser dadas como una distribución uniforme o cargas concentradas en un punto, cualquiera produce el esfuerzo mayor en los miembros soportes. Las cargas vivas, se supone incluyen un margen adecuado para condiciones ordinarias de impacto. Las precauciones deberán tomarse por usos y cargas que provocan vibraciones inusuales y fuerzas de impacto.

Margen para cargas de impacto.

Por propósitos de diseño, el peso de la maquinaria y cargas móviles deberán incrementarse para permitir el impacto. Algunos de los factores de impacto requeridos por los códigos son:

- (1) Mecanismo elevador, 100 %
- (2) Mecanismo de luces, flecha o motor-impulsor, 20 %
- (3) Maquinaria recíprocante, o todas las unidades impulsoras de poder, 50 %
- (4) Ganchos para techos 33 %
- (5) Grúas, cargas diseñadas para diferentes fuerzas a ser incrementadas por:
 - Fuerza vertical igual a 25 % de la carga máxima de la rueda (giro).
 - Fuerza lateral igual a 10 % del peso del tranvía y carga solamente elevada, aplicando 1/2 a el tope de cada riel.
 - Fuerza longitudinal de 10 % de la carga máxima de la rueda de la grúa, aplicada al tope del riel.
- (6) Todos estos factores de impacto deberán ser incrementados, si es recomendado por el fabricante del equipo.

Requerimientos de códigos: cargas de peso.

Los códigos requieren de un anuncio junto a un lugar sobresaliente, en todos los espacios para propósitos de almacenamiento en todos los edificios y estructuras. Cada anuncio debe contener la carga usada en el diseño de aquel espacio. El peso máximo de material almacenado en el piso del edificio o en las plataformas que soportan cargas, excepto aquellos apoyados directamente en la tierra, que no deberán exceder la capacidad soportada de seguridad de el piso o plataforma.

Los materiales almacenados no deberán causar un peligro, y será limitada la altura, siendo apilados o soportados de una forma diseñada para prevenir las inclinaciones, fallas, colapsos, bamboleo o desplegados. Los soportes, depósitos, estatutos de plataforma, durmientes y plataformas deben ser usadas donde es necesario hacer pilas y montones de material estable.

Requerimientos de código: Esfuerzo de trabajo.

El esfuerzo máximo permisible de trabajo, permitido por el código de concreto es basado en su último esfuerzo compresivo. Esta fuerza (psi) es determinada por una prueba a compresión en un cilindro de concreto que es de 6 in de diámetro y 12 in de longitud y es expresada por el símbolo f_c' .

La última fuerza compresiva del concreto varía de 2000 a 5000 psi, dependiendo de la relación de cemento agregado en la mezcla. La cantidad de agua usada (gal/yd³ de concreto), también tiene relación con el último esfuerzo compresivo, por lo tanto, una mezcla con más cemento y menos agua tiene una fuerza compresiva alta.

La mayoría de códigos de construcción requieren que cuando el concreto tiene una fuerza compresiva tan grande como de 2000 psi se especifican pruebas simples bajo la supervisión de un inspector con licencia.

A causa de la necesidad de un factor de seguridad, la última fuerza compresiva del concreto no es el esfuerzo máximo permisible. Solamente una porción de la última fuerza es usada como el esfuerzo máximo de trabajo. Se presentan diferentes aproximaciones para la determinación de este:

Un método asigna un porcentaje, o factor, para el valor de la última fuerza compresiva, y este valor se convierte en el esfuerzo máximo permisible.

Un método más reciente para determinar la fuerza requerida de un miembro estructural usa la última fuerza del material, pero incrementa la carga sobre el miembro. Un incremento en el factor de carga es aplicada a cada una de las cargas combinadas en el miembro. Estas combinaciones de carga posibles incluyen cargas muertas, vivas y laterales de viento y temblor. El diseño para el incremento en las condiciones de carga suministran el factor, llamado el factor de reducción de capacidad, que difiere para varios tipos de estructura, desde 0.65 a 0.90.

CONCRETO REFORZADO PARA ESTRUCTURAS Y EQUIPOS.

El concreto es el tipo de material más práctico y permanente, usado para la construcción en las industrias de procesos químicos. Comparado con el acero o madera, el concreto es relativamente incombustible y resistente a la corrosión. También es usado en subterráneos y sirve como fondo estable para equipos pesados y vibrantes.

Los materiales para las construcciones de concreto reforzado son pocos y relativamente simples. Estos consisten de cemento portland (que es el adhesivo), piedras en bruto, acero para reforzar, cemento y agua. El agua es adicionada a la mezcla de cemento y se agrega la necesaria para la hidratación del cemento y para fluidez de la mezcla en el vaciado. El acero para reforzar cemento tiene la forma de una red, barras deformadas o cables tensados, y suministran la fuerza de tensión que a el concreto endurecido le falta.

Los costos de instalación para estructuras de concreto como cimientos, losas en declive, y marcos, son relativamente más bajos, que para los forjados y estructuras reforzadas como columnas, muros y losas elevadas. La mayor diferencia en el costo es debido a el forjado y el refuerzo, porque los costos del concreto y su colocación son casi constantes.

Fuerza del concreto.

Bajo condiciones favorables, una estructura de concreto alcanzará una fuerza final igual a la fuerza de cizallamiento de la piedra. Para lograr esto, sin embargo, se requiere cuidado y atención en los detalles, porque las fallas en las construcciones de concreto son difíciles y costosas de corregir. Tales fallas pueden ser originadas, por uno o varias causas: ingredientes, mezclado, colocación o colado, curado y reforzado.

* Ingredientes para concreto.- Para un concreto correctamente proporcionado, hay una relación de agregados finos (arena) y un agregado grueso (grava) para hacer una mezcla tan densa como sea posible. Ambos agregados, finos y gruesos, deberán estar limpios y duros, libres de arcillas y cieno. Las superficies de los agregados deben ser anguladas y afiladas; los agregados planos y redondeados que se hallan en las playas o en el lecho de los ríos no deben ser usados.

* Procedimientos de mezclado.- Los ingredientes secos, consistentes de cemento portland, arena y grava (en sus proporciones adecuadas), deberán ser completamente mezclados

antes de adicionar el agua. La mezcla asegurará que cada partícula de los agregados es completamente rodeada por una pasta de cemento y agua.

El agua usada para la mezcla del concreto, deberá ser tan limpia como sea posible, o el equivalente en agua potable. Las propiedades del cementado o ligadura de la mezcla de concreto son debidas a la reacción química entre el cemento y el agua. Solamente una pequeña cantidad de agua es necesaria para esta reacción, pero el agua adicional es usada para obtener una mezcla fácil de trabajar. Sin embargo, la cantidad de agua deberá controlarse cuidadosamente, porque un exceso reducirá la fuerza de la pasta de cemento.

* Colocación o colado.- La colocación física de la mezcla de concreto en la forma apropiada es crítica, porque debe prevenirse una separación de los agregados gruesos. Cuando es descargada la mezcla de concreto, por una pared formada, la corriente de concreto deberá ser guiada de manera que se eviten rebotes desde los lados de la forma; de lo contrario los agregados gruesos orincarán más que las partículas finas, causando una separación de la mezcla.

* Curado de la mezcla.- La reacción química (curado) entre el cemento y el agua requiere de un tiempo y condiciones favorables. La reacción es rápida durante la fase temprana, y más lenta después. Aquí, una atención apropiada a el curado puede hacer una gran diferencia en la última fuerza del concreto.

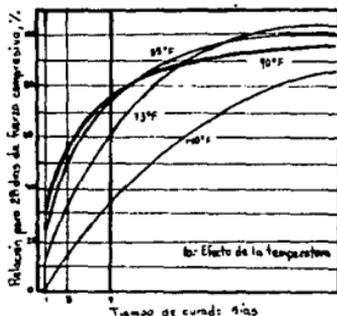
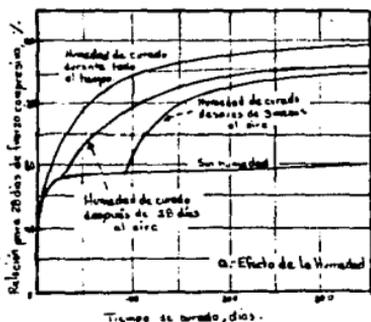


FIG. 7. INFLUENCIA DEL TIEMPO, TEMPERATURA Y HUMEDAD EN LA FUERZA FINAL DEL CONCRETO.

No debe permitirse la mezcla de concreto en seco y rápidamente, porque la reacción química se detendrá prematuramente. Para la fuerza máxima, el concreto debe estar húmedo durante todo el período de tiempo de curado (fig. 7a).

B) la reacción química es detenida por causa de un secado prematuro, el concreto puede comenzar a abrirse. La última fuerza compresiva se incrementará, pero no alcanzará el mismo valor que debe tener con una humedad continua, durante el curado. Cuando el período de secado es demasiado largo causa grietas, y la última fuerza será baja.

La temperatura ambiente durante el período de curado, también tiene una relación con la última fuerza compresiva; la reacción química es más rápida a temperaturas altas que a temperaturas bajas. A temperaturas sobre los 140°F, sin embargo, la última fuerza compresiva será más baja que la lograda por un curado de 50 a 70°F. En ambiente fríos, se usan mezclas especiales o el concreto es mantenido tibia durante el curado, por aplicación de calor externo (ver fig. 7b).

4 Reforzado.— Cuando el concreto está fijo o se ha endurecido es relativamente débil para resistir esfuerzos de tensión, aunque es muy fuerte para resistir compresiones. Para vencer esto, refuerzos de acero de la forma forjada son empotrados en las áreas, donde se espera que halla esfuerzos de tensión.

Las barras reforzadoras deformadas son localizadas cerca del fondo de las vigas simples, y cerca del soporte de la cara de la pared retenedora (las deformaciones en las barras son producidas durante el rolado, y son usualmente en relieve). En grandes losas, como las del pavimento, se usa cemento reforzado para prevenir el rompimiento debido a expansiones y contracciones térmicas.

Las barras reforzadoras también se usan para incrementar la fuerza compresiva del concreto. Cuando las barras de acero son instaladas en columnas de concreto (fig. 8a), las barras soportan una porción de las fuerzas compresivas; esto incrementa la capacidad de las columnas. La mala colocación o la falta de barras puede causar una falla catastrófica en una estructura larga.

Las barras reforzadoras deben ser soportadas con "sillas" o espaciadores para dar la cubierta apropiada a las barras y el concreto. Esta cubierta es necesaria para proteger las barras de las altas temperaturas en ocasiones de fuego. En la mayoría de los casos, se requiere de 1 1/2 in. de cubierta, excepto para construcciones resistentes al fuego o donde el concreto estará en contacto con la tierra.

Para bases, cimientos o losas en contacto directo con la tierra, el mínimo de cubierta es 2 in, cuando el concreto es localizado junto a otras formas, es de 3 in, y cuando es vertido directamente en la tierra (fig. 80).

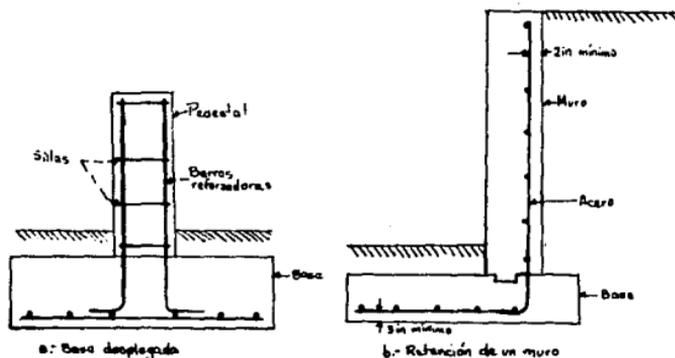


FIG. 8. BARRAS REFORZADORAS EN EL CONCRETO.

El mínimo de espacio libre entre las barras paralelas excepto en columnas debe ser igual al diámetro nominal de las barras. El empalmado en barras, debe ser entre 20 y 30 diámetros en longitud, dependiendo de la fuerza sobre el concreto que se este usando.

Concreto prefabricado.

El concreto prefabricado es muy usado para la construcción de almacenes de blancos y edificios. La construcción prefabricada ofrece economía, rápida instalación, mejor control del acero usado para reforzar y colocación del concreto, y un buen terminado para las superficies del concreto. Tales construcciones son usadas para columnas, vigas, cubiertas, techos con vigas de largo alcance, paredes cortina y techos de edificios altos.

En construcciones con techos inclinados, los paneles de las paredes son prefabricados horizontalmente; cuando son curados, estos paneles son levantados con una grúa a la posición vertical y colocados sobre sus soportes, cuando es posible, los paneles son prefabricados uno encima de otro, formando una pila de paneles.

Cimientos para equipos.

Los cimientos para equipos de proceso son generalmente de los siguientes tipos:

- Bases rectangulares u octagonales para recipientes verticales de diámetro pequeño, (fig. 7a y 7b).
- Bases rectangulares u octagonales con pedestales para soportes armados de tuberías o para recipientes largos verticales.
- Cimientos de bloque para compresores, bombas y equipo vibrante (fig. 7c).
- Bases continuas y cimientos de muro para vasijas horizontales, tanques largos elevados y gruesos (fig. 7d).
- Marcos estructurales para un grupo de equipo, tanques o torres de enfriamiento.

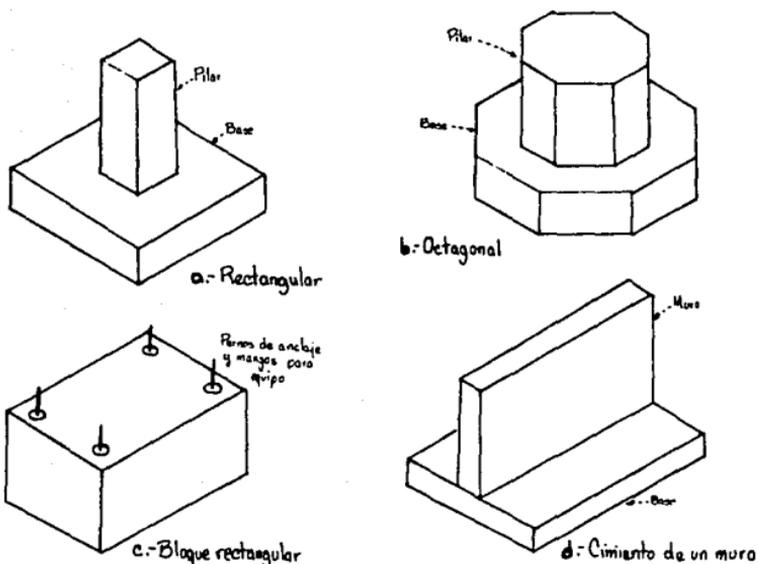


FIG. 7. CIMIENTOS TÍPICOS PARA EQUIPO DE PROCESO.

ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERIA.

La mampostería es uno de los materiales más comunes para la construcción de edificios y otros, para la industria de procesos químicos.

Los ladrillos de barro son usados para construir paredes de ladrillo sólidas (fig.10), paredes huecas, paredes de argamasa, y paredes de argamasa reforzadas. Los ladrillos de barro son usados también como cubiertas, pavimento y refractarios.

Las unidades de concreto hueco (también conocidas como bloques de concreto huecos, bloques de cenizas, y mampostería de concreto) son usados para construir paredes no reforzadas, de sostén y cimientos.

Los materiales de construcción para las unidades de mampostería incluyen barro o arcilla, arena, cal, concreto, y escoria de cemento; y materiales porosos como piedra pómez.

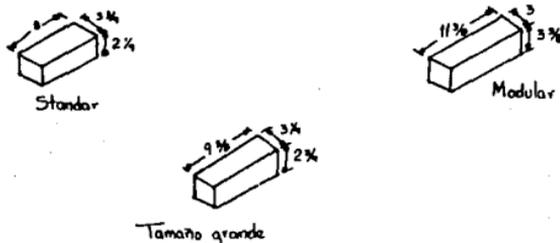


FIG.10. LADRILLOS PARA CONSTRUCCION DE PAREDES.

Mampostería de ladrillos de barro.

Básicamente, son usados dos tipos de ladrillos de barro: para construcción o ladrillo común, y ladrillo revestido.

* Los ladrillos para construcción son hechos de barro tal y como llega del pozo, y son formados en un número de tamaños; algunos de los más comunes se muestran en la fig.10. Los ladrillos para construcción tienen superficies planas, con un matiz rojo que es el color dominante.

* Los ladrillos revestidos son hechos de mezclas controladas de barro o arcillas, contienen minerales, que con el fuego en un horno produce unidades fuertes y resistentes. Estos ladrillos se hacen en varios colores.

La argamasa para la unión de los ladrillos debe ser manejable, retener el agua, tener la capacidad para desarrollar una unión, resistente al agua y la propiedad de sufrir un cambio mínimo en su volumen, al secar. La argamasa se compone usualmente de una parte de cemento portland bajo en álcali, 4 1/2 partes de arena, y 1/2 parte de cal (hidratada). La exposición final de la junta de argamasa puede ser aplanada o cóncava, rastrillada, oblicua o arrojada. La junta aplanada es la más resistente al agua (impermeable), mientras que las otras son usadas para la apariencia estética. La mampostería puede ponerse en una unión corrida o en una unión de diseño apilado (ver fig.11).



a. Unión corrida



b. Diseño apilado

FIG.11. DIFERENTES DISEÑOS DE MAMPOSTERÍA.

Mampostería de bloques de concreto.

La unidad básica para mampostería de concreto, es un bloque de concreto prefabricado. Los bloques de concreto tienen cada uno un peso, y son disponibles en varios tamaños, algunos de los cuales se muestran, con sus dimensiones presentes, en la fig.12.

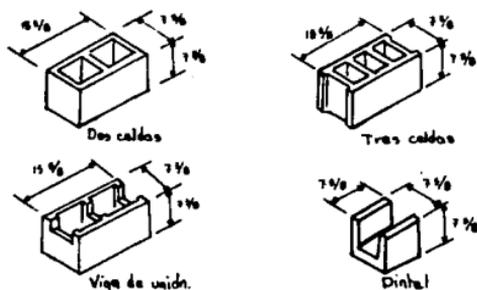


FIG. 12. CONFIGURACIONES DE LOS BLOQUES DE CONCRETO.

Las unidades para mampostería de concreto son prefabricados con celdas huecas que reducen el peso de cada unidad, y da un espacio con aire dentro de las paredes de mampostería, que actúa como un obstáculo térmico y para el sonido. En algunos casos, aisladores, como la vermiculita es colocada dentro de las celdas, para dar a la pared un tipo de aislamiento.

Los bloques de concreto son nominalmente de 8 in de alto por 8 in de ancho y 16 in de largo. Los bloques también son disponibles en anchos de 4, 6 y 12 in, estas son dimensiones nominales. El tamaño real es de 3/8 in menor, con objeto de preveer la junta de argamasa. Para planear y modular un arreglo, deben usarse las dimensiones nominales.

Diseño modular.

Tomando las ventajas de diseño modular, las ventanas y puertas fabricadas de mampostería con bloques de concreto, deben ser de dimensiones modulares, y dispuestos adecuadamente o bloques de tamaño medio. Todas las dimensiones horizontales, deben ser en múltiplos de 8 in, o bloques de longitud media. Todas las dimensiones verticales deben ser múltiplos de 4 in, las mismas unidades que el promedio. Los bloques especiales son usados para elementos estructurales específicos de una construcción. Las vigas reforzadas y los dinteles pueden hacerse con bloques en forma de U. Una viga horizontal integral con el muro es nombrada "viga unión". Las porciones gruesas del muro, son con el propósito de soportar los durmientes del techo. puntales extremos, que son llamados pilastras. Los bloques pilastra (Fig. 13) son hechos de 12 in y 16 in de ancho.

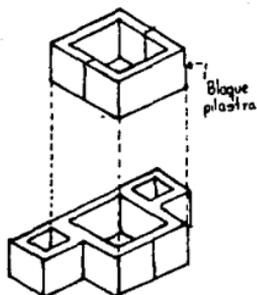


FIG.13. BLOQUES PILASTRA.

Especificaciones de construcción.

Las especificaciones para la construcción con mampostería son:

- * Las unidades de mampostería deben ser grado A conforme a la especificación C90 del ASTM.
- * El cemento será conforme al ASTM C150.
- * La argamasa deberá ser preparada recientemente y mezclada uniformemente en la proporción de 1 parte de cemento, 1/4 de cal, 3 1/2 partes de arena; conforme al ASTM C270.
- * La argamasa clara debe ser de consistencia fluida y mezclada uniformemente en la proporción de 1 parte de cemento y 3 partes de arena o 1 parte de cemento, 2 partes de arena y 2 partes de grava.
- * El reforzado debe ser con barras deformadas conforme al ASTM A15 y A305, excepto que a un 1/4 in esten unidas, pueden ser barras ordinarias.

Requerimientos de código.

Los códigos de construcción son usualmente limitantes en la proporción de el peso a el ancho de la pared, h/t. Esta relación, difiere de un muro reforzado a uno no reforzado, muros de apoyo y de no apoyo, muros exteriores o interiores.

Algunos valores típicos de esta relación son:

TIPO DE MURO	RELACION, h/t
No apoyo:	
Exterior no reforzado	30
Exterior reforzado	30
De apoyo:	
Interior reforzado	25
Exterior reforzado	25

El Uniform Building Code requiere que el área de acero en un muro de mampostería reforzada, no debe ser menor que 0.002 veces el área del muro, y que no debe ser menor a 1/3 de el acero localizado en cada una de las direcciones.

Por ejemplo, en un muro nominal de 8 in de ancho, el área del muro de un bloque estándar es 96 in² (es decir 8x12). De acuerdo con el código el área mínima de acero por bloque debe ser:

$$(1/3)(0.002)(96) = 0.064 \text{ in}^2$$

CONSTRUCCION CON FORMAS DE ACERO PARA ESTRUCTURAS DE PROCESO.

La construcción con estructuras de acero es probablemente el medio más organizado y estandarizado para levantar un edificio y da facilidades auxiliares para las industrias de procesos químicos. Las propiedades estructurales de las formas de acero son más consistentes y menos afectadas por el medio ambiente, manejo y manufactura, que los materiales naturales como madera, o materiales de campo reunidos como el concreto y la mampostería.

Los armazones de acero son usados para construcciones de almacenamiento, protección a compresores, cuartos de control, soportes de tubería, estructuras para reactores y procesos de construcción.

Muchos ingenieros químicos se involucran con el diseño, construcción o modificación de una planta de proceso y deberá estar familiarizado con el manual "Manual of Steel Construction", la terminología de los sistemas de armazones de acero, el método aceptado de bosquejo y preparación de planos, el método estándar de conexiones de acero, análisis de esfuerzos básicos y estimación de costos. El campo de la fabricación y levantamiento de estructuras de acero tiene sus estándares, nomenclatura, métodos de dimensionamiento, y métodos de bosquejo normalmente aceptados.

Formas de acero roiado.

Las estructuras de acero roiado, manufacturadas en talleres tienen un rango amplio de miembros, también conocidos como formas o secciones. En el pasado estas secciones, se referían como vigas I, vigas de bordes anchos, vigas junior, canales y ángulos. La terminología ahora ha sido simplificada a:

NOMBRE DE LA FORMA	SÍMBOLO
Estándar	S
Bordes anchos	W
Canal	C
Ángulo	L

El American Institute of Steel Construction (AISC) se ha organizado para patrocinar el diseño correcto y aplicación de miembros de acero en la construcción, y para dar un servicio de asesores a ingenieros y a la industria de la construcción.

Planos de construcción.

Las construcciones de acero requieren de tres tipos de dibujos: a) diseño, b) fabricación (detalles), y c) levantamiento, como se muestran en la fig.14. El diseñador de las estructuras, usualmente prepara el plano de diseño. El fabricante de acero es el responsable de la preparación de los planos de fabricación y levantamiento.

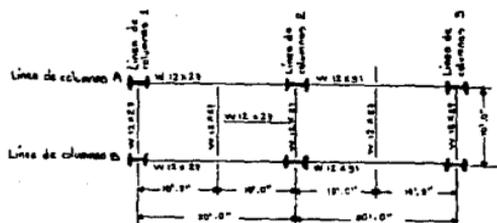
Los dibujos del diseño de las estructuras de acero son líneas simples que muestran el tamaño y localización de cada miembro, columna, viga o durmiente. Las dimensiones son dadas para líneas de trabajo o puntos de trabajo.

Una línea de trabajo es la superficie principal de la viga, la línea central de una columna, la cara posterior de un canal, o el eje neutral de un ángulo. El punto de trabajo es la intersección de 2 o más líneas de trabajo.

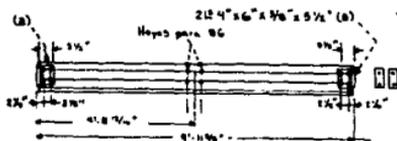
Planos de diseño, fabricación y levantamiento.

Los planos de diseño desarrollan desde el arreglo de el equipo, hasta las condiciones de carga. Aunque estos diagramas son líneas simples, el diseñador debe estar informado del largo y ancho de cada miembro, para evitar interferencias. Las partes del plano de diseño incluyen los detalles estructurales para las conexiones y armazones complicadas. Ordinariamente, las estructuras de acero no son fabricadas directamente del plano de diseño, de este modo se requiere de los planos de fabricación.

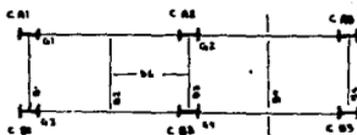
Los planos de fabricación suministran los detalles de cada pieza de acero, desde columnas mayores hasta pequeños ángulos. Los detalles de fabricación muestran las intersecciones de los largos de cada miembro, todos los hoyos adecuados para pernos y clavos, superficies para ser fabricadas o pintadas, y otra información.



a. Dibujo de Diseño



b. Detalles de fabricación para la viga 02



c. Plano de levantamiento.

FIG. 14 PLANOS DE CONSTRUCCION CON ACERO.

Los detalles de fabricación siguen al plano de diseño pero autorizan las dimensiones adecuadas, espacios libres, recortes, las combinaciones de los hoyos, y todos los biselés y dimensiones diagonales. Cada pieza tiene una separación y un número marcado; usualmente el primer dígito de este número marcado identifica el número del plano de fabricación, en el cual aparecen los detalles; el siguiente símbolo (B, G o C) denota viga, durmiente o columna, y el número final denota el número del punto en el plano.

Los planos de levantamiento consisten de planos de armado y elevaciones. Estos son similares a los planos de diseño, excepto que el número marcado aparece adyacente a cada miembro para su identificación.

Las estructuras de acero son ordenadas en una lista de material que se muestra en cada plano de fabricación, esta lista describe el tamaño, longitud y peso de cada pieza para ser entregada por el fabricante.

Formas de construcción.

Las formas de acero, como las que se muestran en la fig.5, consisten de muchas partes; los muros comprenden columnas, vigas, barras bajas, puntales alero, y tirantes de refuerzo. Los techos incluyen puntales, correas, vigas (cabrio), barras bajas, tirantes de refuerzo y puntales caballete.

Una soldadura continua de las unidades columna y cabrio, como se muestra en la fig.15, es conocida como una forma rígida. El puntal de la fig.16, contiene un tope o cima y una viga de fondo, miembros de red y escuadras metálicas que son la conexión entre la placa y el miembro.

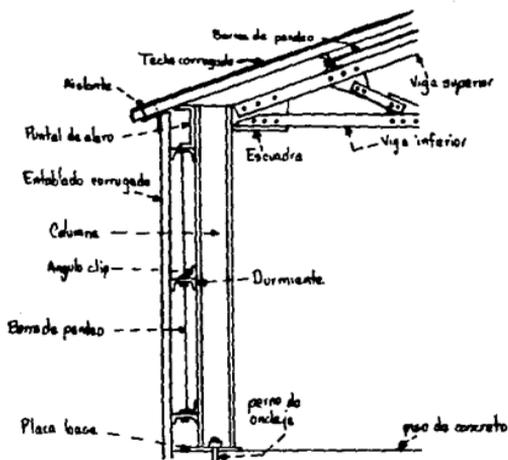


FIG.16 DETALLES DE UN PUNTAL.

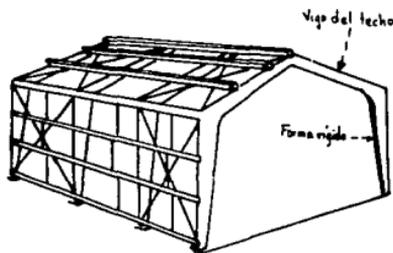


FIG. 15. FORMA RIGIDA.

Los edificios industriales son usualmente encerrados con hojas metálicas que son de acero galvanizado o aluminio, estas hojas son corrugadas o acañaladas, algunas son instaladas y pre pintadas.

Diseños prefabricados.

Una forma popular de construcción industrial es el edificio preconstruído. Para diseños estándar y aplicaciones, este es quizás el más económico. Las dimensiones estándar para tales edificios son: ancho de 40, 60, 80, 100 y 120 ft; un rango de altura desde 12 a 28 ft; y longitud en incrementos de 20 o 40 ft para una longitud total de 400 ft o más. Los techos inclinados son de 1:12 ó 4:12. Las formas rígidas usualmente tienen centro a espacio centro de 20 o 40 ft.

En este tipo de construcción, los miembros secundarios (vigas correas, puntales de acero, ángulos) son los responsables de un edificio económico. En vez de las formas roladas en caliente se tienen formas estructurales de acero forjadas en frío de 12, 14 y 16 galga de poco peso. Estos son hechos de acero con una fuerza de tensión alta, teniendo una fuerza producida de 50 000 psi; comparada con las formas roladas en caliente de 35 000 psi de fuerza producida, y permitiendo un esfuerzo de pandeo de 2 200 psi.

La principal forma estructural de edificios prefabricados consiste de una sección construida en pie, de placas de acero ligero, formando una sección de bordes anchos. Por economía, los cumbrimientos o vices, columnas y cabrios son rematados en punta, tal que el momento de inercia obedece a el esfuerzo de pandeo; esto reduce el peso que debe ser requerido, si la sección es rollada se usa una profundidad constante.

El acero estructural es disponible en un rango amplio de composiciones. La más común es; ASTM A36 o acero ligero, el cual tiene un esfuerzo mínimo producido de 36 000psi. Otros grados son; ASTM A242, ASTM A441, ASTM A529, ASTM A572 y ASTM A588. Algunos de estos tienen un esfuerzo producido de 42 000 a 58 000 psi. Usando estos grados de acero, podemos reducir el peso de la estructura, sin embargo, las cuestiones de disponibilidad y costo para estos grados deben considerarse.

SOPORTES PARA VASIJAS DE PROCESO Y EQUIPO DE ALMACENAMIENTO.

Después de la realización del diagrama de flujo de proceso, o los diagramas de proceso e instrumentación, el ingeniero debe proceder con un arreglo de la planta y, posiblemente una estimación de costos del proyecto. Para cada paso, el ingeniero debe convertir los diferentes símbolos del diagrama de flujo que representan equipo de proceso, vasijas y tanques, y sus estructuras de soporte, en objetos físicos consistentes de acero y concreto.

Los tipos de equipo de las plantas de proceso más comunes son listados a continuación. Cada uno de estos equipos es primeramente diseñado para servir a una función de proceso, pero cada uno debe también:

- * Resistir todas las fuerzas internas y externas.
- * Suministrar el medio para su operación y mantenimiento.
- * Ser tan económico como sea posible.

Los diseños para muchos de estos puntos son establecidos por varias organizaciones estándar; algunas de estas son: American Petroleum Institute (API), American Society of Mechanical Engineers (ASME), y American National Standards Institute (ANSI). Además el diseño y la fabricación deben cumplir con las reglas de seguridad apropiadas.

Recipientes a presión verticales.

Un equipo de proceso para líquidos es usualmente referido como un recipiente a presión, porque estos contienen y resisten presiones hidrostáticas y presión de gas. Estos pueden ser recipientes cilíndricos horizontales o verticales, con tapas en forma elíptica. Si el contenido es principalmente gases a presión, normalmente se usan tanques esféricos.

Fara recipientes verticales, deben considerarse otras fuerzas debidas a la presión interna del contenido; estas fuerzas pueden surgir por efectos gravitacionales y por los efectos de viento y sismos.

Las fuerzas causadas por la gravedad incluyen el peso del recipiente y sus tapas, colisiones internas o placas, tuberías unidas, escaleras y jaulas, plataformas y aislación. Un recipiente vertical se soporta sobre un borde, el cual es una extensión cilíndrica de la cubierta y más adelante la base de la tapa. La fig.17 muestra varios componentes de un recipiente a presión vertical.

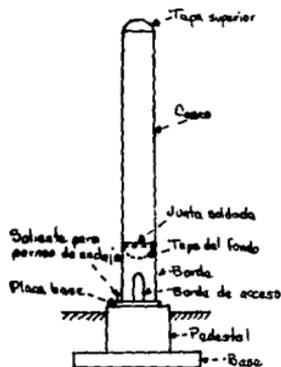


FIG.17. COMPONENTES Y CIMIENTOS PARA UN RECIPIENTE A PRESIÓN VERTICAL.

Las fuerzas laterales que actúan sobre el recipiente incluyen las que surgen del viento y de los temblores. La presión del viento en una superficie cilíndrica es relativamente fácil de calcular. La velocidad del viento puede convertirse en fuerza, lb/ft^2 , esta fuerza es usualmente reducida 60% de el área proyectada de la superficie cilíndrica.

En la mayoría de las situaciones, la presión del viento varía con el peso del objeto. Una distribución común de la carga del viento es un incremento de 5 lb/ft² por cada 30ft de alto.

Cálculo de cargas verticales.

Las cargas verticales de el recipiente se calculan bajo estas tres condiciones:

- (1) El recipiente está vacío. Esta es la condición más crítica, cuando tenemos la carga máxima del viento.
- (2) El recipiente está siendo probado. Esta es una condición de poca duración, cuando el recipiente se llena con agua (no se consideran las cargas de viento y temblor bajo estas condiciones de prueba). Esta condición causa el máximo esfuerzo en el casco del recipiente y tapas.
- (3) El recipiente está en condiciones de operación. Esta condición es combinada con la de vientos y sismo.

Suponemos que el recipiente lleno y las tapas son diseñadas de acuerdo con el ASME, los bordes, las columnas, pernos de anclaje y cimientos son diseñados por análisis estructural. El análisis de cargas se hace bajo las siguientes condiciones:

- (1) Las cargas vertical y del viento con el recipiente vacío.
- (2) Las cargas verticales, solamente bajo condiciones de prueba.
- (3) Las cargas verticales y sísmicas o de viento con el recipiente en condiciones de operación.

Bajo la primera y tercera condiciones, el recipiente es probado para derribado o vuelco, alrededor de su base (el número de pernos de anclaje requeridos para resistir el 150% de el momento de vuelco), el tamaño del cimiento para resistir 150% de el momento de vuelco; y el esfuerzo compresivo máximo en los bordes, las bases y piso. Estos valores son comprobados contra el esfuerzo máximo compresivo bajo la segunda condición.

Cimientos para un recipiente vertical.

Los cimientos para un recipiente vertical con menos de 4ft de diámetro, son usualmente pedestales cuadrados o fuera de la base.

Los recipientes con más de 4ft de diámetro son normalmente soportados en un pedestal octagonal, soportado por una base octagonal. La forma octagonal es la más cerrada que sigue el contorno transversal, de la carga de el recipiente, y es una pieza "circular" sin la dificultad de construir un pedestal y base totalmente circulares. Una forma cuadrada requiere mucha área y concreto, sin la ventaja de la forma octagonal.

El tope o cima del pedestal es usualmente de 1 ft, alrededor del declive terminado, o punto alto de el pavimento que circunda el recipiente. El fondo de la base es usualmente de 3 ft debajo del declive natural de el terreno, o profundidad del suelo.

Los pernos de anclaje deben ser fijos en un "mango" para permitir un ajuste, en caso de un mal colocado en el concreto. El centro de los pernos debe proyectarse alrededor del concreto con una longitud suficiente para permitir la profundidad de la argamasa clara, más el espesor de la placa base, más la profundidad de 2 tuercas. La longitud total del perno alrededor del concreto es generalmente referido como "proyección del perno".

El número y tamaño de los pernos de anclaje, es gobernado por dos fuerzas: a) cizallamiento total debido al viento o sismo, y b) 150% del levantamiento calculado debido al viento o a las fuerzas de vuelco debidas a sismos. La longitud empotrada del perno de anclaje en el concreto, depende de la fuerza de unión desarrollada entre el perno y el concreto, y la fuerza total de tensión de el perno. Esta longitud es calculada igualando la fuerza de unión a la fuerza de tensión.

El espesor de la base se fija usualmente por el volumen requerido de concreto y la tierra superpuesta, para resistir el vuelco del recipiente. Para el espesor de la base, se requiere el menor refuerzo de acero. Un ejemplo de un recipiente vertical y su cimiento octagonal se muestra en la fig.17.

La mayor parte de los componentes de un recipiente vertical son:

- (1) Casco.- La porción cilíndrica principal.
- (2) Tapa superior.- Forma elíptica.
- (3) Tapa del fondo.- Forma elíptica.
- (4) Grilla o borde.- Extensión cilíndrica de el casco debajo de la tapa del fondo.
- (5) Ángulo o base.- Base horizontal para soportar el recipiente en el cimiento.
- (6) Borde de acceso.- Abertura para ajustar la conexión a la tapa del fondo.

- (7) Saliente para pernos de anclaje.- Accesorio de el fondo para el perno de anclaje.
- (8) Saliente para levantamiento.- Accesorio tope del recipiente para levantarlo.
- (9) Plataforma.- 90, 180 ó 270 grados para operación y mantenimiento.
- (10) Escaleras.- Para el acceso a la plataforma.
- (11) Jaula.- Protección para las escaleras a mas de 20ft de alto.
- (12) Mensulas.- Accesorios para tuberías, plataformas, aislamiento y otros auxiliares.

Recipientes horizontales.

Los recipientes horizontales, como el de la fig. 18, son menos afectados por las fuerzas del viento y sísmicas. La mayoría de los elementos de diseño estructural involucran los esfuerzos, en el llenado y en las tapas, debidos a presiones internas. Su análisis es aproximadamente el mismo que para recipientes verticales.

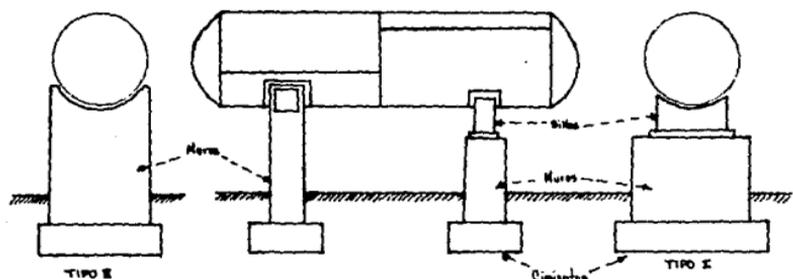


FIG. 18. TIPOS DE MUROS SOPORTE PARA UN RECIPIENTE HORIZONTAL.

Para la mayoría de los diseños, el punto débil de el recipiente ocurre en la soldadura longitudinal en el casco; esta soldadura es usualmente una penetración de la soldadura en la pipa, y se supone que es alrededor del 50% tan fuerte como el casco. Se recomienda una corrosión permitida de 1/8 in. la cual es deducida de el espesor de la placa.

Los principales componentes para un recipiente horizontal (Fig.18) son menos que para uno vertical, y consisten de: el casco, tapas elípticas y sillas.

Cimientos para un recipiente horizontal.

Los cimientos de un recipiente horizontal consisten de 2 ó 3 muros verticales de concreto, dependiendo de la longitud del recipiente, soportados por una base continua debajo de cada muro. Los muros pueden tener un nivel tope cuando el recipiente es equipado con sillas de acero (Tipo I, fig.18), o puede ser formado para soportar el casco directamente (Tipo II). El espesor de estos muros es usualmente de 8 in mínimo; el alto de el recipiente es gobernado por los requerimientos del proceso.

Los muros son diseñados para resistir el vuelco, principalmente en la dirección longitudinal de el recipiente. Cuando se permite que el recipiente sea deslizado en el otro muro para una expansión térmica, normalmente sólo un muro será usado para resistir esta fuerza. Para soportar un cambiador de calor, el cimiento debe ser diseñado con atención especial, para resistir las fuerzas opuestas, al sacar los tubos durante el mantenimiento.

Recipientes de almacenamiento para líquidos.

Los recipientes de almacenamiento, como se muestra en la fig.19, tienen diámetros más grandes que los recipientes de proceso. El casco es requerido solamente para resistir la presión hidrostática del líquido contenido; en el caso de un tanque vacío, el casco debe resistir la presión del aire. Ya que dichos tanques son más o menos estandarizados, sus diseños pueden obtenerse de estándares del AFI, y AWWA (American Water Works Assn.) y varios fabricantes de tanques.

Los líquidos que tienen alta gravedad específica o son corrosivos requieren de especial atención, para estar de acuerdo a los requerimientos del ASME y ANSI. La mayoría de los requerimientos de un tanque de almacenamiento son:

- (1) Casco.- El grueso es gobernado por la altura y el diámetro.
- (2) Tapa.- Su diseño es gobernado por la forma: cónica, flotante, plana, etc.
- (3) Fondo.- Su diseño depende de los requerimientos de corrosión y soldado del casco.
- (4) Anillo de la tapa.- Depende de la carga del viento y la presión interna.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

- (5) Anillo del fondo.- Depende de las fuerzas sísmicas, de levantamiento y presión interna.
- (6) Escaleras, jaulas, soldaños, plataformas y pozo de drenaje.

Las fuerzas del viento y sísmicas afectan los tanques de almacenamiento en un grado menor que a los recipientes delgados. Se requiere un cuidado especial en el diseño de la conexión del casco a la base, para tanques plásticos reforzados con fibra de vidrio. Un tanque de diámetro mayor que 1.5 veces tan largo como alto no es usualmente vulnerable a esfuerzos de vuelco.

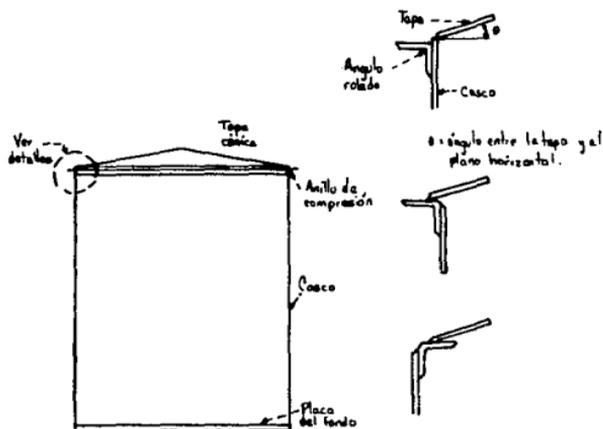


FIG.19. TANGUES DE ALMACENAMIENTO DE LIQUIDOS.

Los tanques subterráneos tienen otros requerimientos de diseño, estos tanques son recipientes cilíndricos horizontales con placas planas en los extremos. El esfuerzo mayor surge de el peso de la tierra, y la sobrecarga debida a vehículos y estructuras adyacentes. El doblado de el casco o los extremos es prevenido con un relleno de respaldo compacto de tierra y arena, en la excavación alrededor del tanque.

Los tanques subterráneos son susceptibles de sufrir un levantamiento fuera de la tierra, cuando es combinado un alto contenido de agua, un tanque vacío y la falta de una cubierta adecuada. Esto puede prevenirse colocando un relleno de concreto debajo del tanque, para que el tanque sea asegurado por correas de acero. El relleno deberá ser suficiente para compensar la posible flotación del tanque cuando este vacío y parcialmente sumergido por el agua subterránea.

ESTRUCTURAS DE ACERO Y CONCRETO PARA SOPORTAR EQUIPO DE PROCESO

El proyecto o la ingeniería de proceso para una planta de procesos químicos, debe suministrar el diseño estructural con cierta información que servirá como criterio para diseñar, detallar y especificar los soportes para los equipos de proceso y maquinaria.

El equipo rotatorio como las bombas centrífugas, motores y turbinas, en soportes solamente de acero, tienen tendencia a vibrar moderadamente. Normalmente, los soportes de acero son diseñados para sostener el 200% de el peso de el equipo rotatorio para prevenir la vibración; este peso extra no es soportado por las columnas.

El equipo recíprocante como las bombas y compresores son un problema más serio que el equipo rotatorio. Los soportes para este equipo son usualmente diseñados para cargas iguales al 300% del peso del equipo. Cuando es muy largo el recíprocante como equipo de molienda de rocas, es soportado por un cimiento de concreto, el diseño del cimiento requerirá de una masa en un rango de 3 a 5 veces el peso de el equipo, para disminuir las severas vibraciones de estas máquinas.

Soportes de equipo.

Una estructura soporte para equipo debe también ser diseñada para varias condiciones. Estas son: 1) equipo vacío más cargas muertas de la estructura, más fuerzas de viento y sísmicas; 2) equipo operando, más cargas muertas de la estructura, más fuerzas de viento o sísmicas; y 3) pruebas de carga con el equipo lleno, más cargas muertas de la estructura, más cargas vivas de la plataforma.

Las cargas especiales para líneas de tubería son usualmente basadas en la suposición de que todas las tuberías son de 6 in de diámetro, y llenas de agua. La fuerza horizontal paralela para el sentido del flujo de la tubería, es tomada como 10 % de la carga vertical; y la fuerza horizontal normal a el sentido del flujo de la tubería es tomada por 20 lb/ft² del viento en 40% del área expuesta de la tubería incluyendo su aislamiento.

Por economía y flexibilidad, debemos elevar el equipo soportado en estructuras de acero. El diseño para las estructuras soporte debe ser simple y directo fuera de piezas complicadas o conexiones elaboradas.

Frecuentemente es deseable eliminar los refuerzos en una sección de la forma soporte, para permitir el movimiento del equipo dentro y fuera de la estructura. Una estructura forjada, rígida (Fig.20a) tiene diversas ventajas, sobre una con refuerzos de carga (Fig.20b): en la primera son pocas piezas para levantar, más espacio libre, más espacio para tuberías y una apariencia limpia.

Las desventajas de las formas rígidas son: costos mayores debidos a la soldadura, y son más difíciles de levantar.

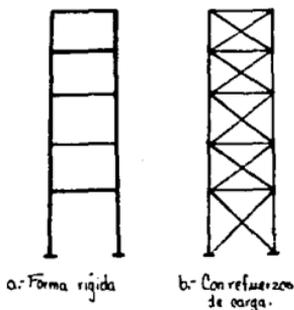


FIG. 20. FORMAS DE ACERO PARA SOPORTES DE EQUIPO.

Estructuras incombustibles.

Las estructuras de acero en las plantas de proceso deben ser incombustibles. Si existe peligro de fuego debido al manejo y procesamiento de productos. El carácter de incombustible se le da, a la estructura, con una capa de cemento, alrededor de todo el miembro estructural de acero, y arriba de 20 ft de alto.

El incombustible puede involucrar una envoltura de varillas o listones de metal, o un material similar, alrededor del miembro. El listón es atado al poste al que es soldada la forma de acero; el cemento incombustible es, entonces, extendido o espolvoreado, sobre el listón que le da 1,2 ó más horas de protección, al acero.

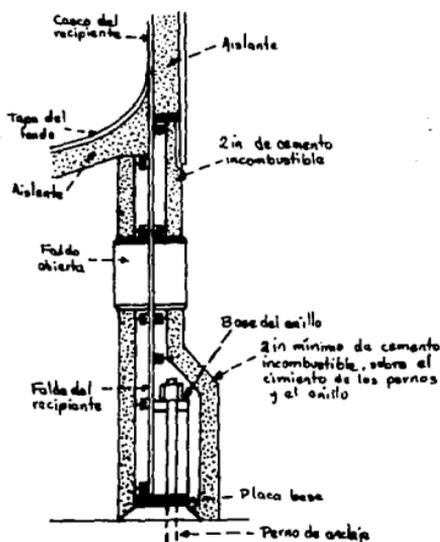


FIG. 21. DETALLES PARA EL INCOMBUSTIBLE DE UN RECIPIENTE VERTICAL.

El mismo soporte del equipo de proceso, con un borde u orilla, también requiere que sea incombustible. El listón de metal es sujeto a ambas caras, interna y externa de el borde, y el material incombustible es aplicado a el listón. La fig. 11 ilustra los detalles típicos para el incombustible de un recipiente vertical.

Cimientos para recipientes horizontales.

El diseño de cimientos para recipientes horizontales no es tan complicado como para los cambiadores de calor. Para un recipiente horizontal, deben determinarse, las dimensiones del recipiente, peso y tamaño de las sillas; también el sito del pilar alrededor del punto alto del pavimento, profundidad del cimiento, tierra sostenida, relación de estabilidad, factor sísmico y carga de viento. Si la temperatura del casco del recipiente es mayor a 400 F y la carga de operación total es mayor a 75 000 lb, el soporte debe ser móvil, esto se logra con ranuras u hovers, para los pernos de anclaje o con una placa que no ofrezca fricción.

Cada pilar soporta el 50% de la carga vertical del recipiente. Las cargas laterales son aplicadas al punto medio del recipiente. En la dirección longitudinal, estas fuerzas son transferidas a el tope de el pilar que es anclado al recipiente.

El diseño del pilar debe ser comprobado para el momento de vuelco debido a las fuerzas laterales, que actúan en la parte superior del pilar. Ambos pilares deben ser del mismo tamaño; el espesor de cada pilar en el plano (sección de carga) es gobernado por el tamaño y tipo de sillas. Para las sillas sin aberturas, el pilar es usualmente de 2 in más largo que el tamaño de la silla; y para sillas que tienen aberturas, el pilar es 4 in más del largo.

El cimiento de relleno que soporta el pilar debe ser menor de 12 in de espesor, y diseñado como una viga soporte, de 1 ft de ancho, cargada con la presión del suelo. En muchos casos, es preferible complicarse con el relleno antes que usar un tope de cemento reforzado con acero.

Cambiadores de calor de tubos y coraza.

Es necesario distinguir entre los canales extremos y la carcaza final del cambiador. La primera tiene forma de una clavija para poder sacar el tubo, y la última contiene el fluido caliente.

El peso del recipiente (vacío u operando) es incrementado el 20% de la cantidad de tubería y accesorios. Se supone que el canal extremo de el cambiador soporta el 60% del peso total; y el otro extremo el 40%. Las fuerzas laterales en los cimientos, para recipientes horizontales, son las mismas para cambiadores de calor, además de la fuerza al sacar los tubos en la dirección longitudinal. Para el cambiador vacío, el haz se toma como 1/3 de el peso del haz de tubos o 2000 lb, en el pilar de anclaje. El criterio mínimo de diseño para el pilar y el relleno es el mismo para todos los recipientes horizontales.

Tanques de almacenamiento.

Los tanques de diámetro grande, como el tanque de almacenamiento de el AFI, que se muestra en la fig.22, requiere sobre todo, una base apropiada bajo la placa soporte del fondo, esta base puede consistir de un lecho de rocas trituradas o arena para amortiguar el peso del líquido contenido. El relleno es inclinado desde el centro del tanque hacia la periferia, por el drenaje, y extendida 5 ft más allá, alrededor del casco, esta es la condición típica para un grupo de tanques en una área de diques. Normalmente, un tanque que tiene una relación diámetro a altura de más de 3 es considerado estable, bajo condiciones de sismo.

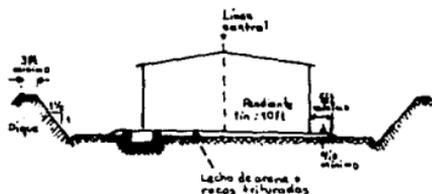


FIG.22. CIMIENTOS PARA UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO EN UN AREA DE DIQUES.

Cimientos y anclaje para bombas.

Dos de los elementos estructurales que son más comunes en las plantas de proceso son los cimientos y los pernos de anclaje para bombas.

El proceso de bombeo opera con acción rotatoria o recíproca, esta diferencia y otras características de operación de las bombas deben tomarse en cuenta en el diseño de sus cimientos. En la fig. 27, se muestran dos tipos de cimientos, para bombas rotatorias y recíprocas. El cimiento para la bomba recíproca contiene una depresión para la tubería de drenaje, mientras que para las bombas rotativas no es así.

El tope del cimiento debe ser arriba del declive para prevenir la inundación del motor eléctrico, y para protección contra el impacto. La profundidad del cimiento debe ser suficiente para que la penetración de agua en el suelo, no suceda y cause un hundimiento del cimiento, también debe ser adecuado el peso del cimiento para disminuir las vibraciones ejercidas por la maquinaria recíproca. El área del fondo del cimiento debe ser la adecuada para distribuir el peso del cimiento, equipo, accesorios y tuberías de aceite, más allá de la bomba, para evitar hundimiento. El cemento reforzado con acero común para el cimiento es el de tipo Jaula, como se muestra en la fig. 28a.

El diseño y colocación de los pernos de anclaje es igualmente importante, la localización de los pernos es establecida por el dibujo certificado del equipo, suministrado por el fabricante.

Como una norma, todos los pernos de anclaje propuestos para asegurar el equipo deben ser fijos dentro de un mango, esto da alguna flexibilidad para un ligero error en la colocación del perno. Los mangos deben ser llenados con poliestireno u otro empaque para prevenir que el concreto lo tape durante el vertido. Cuando el recipiente o equipo es demasiado pesado para ser levantado sobre los pernos proyectados, se debe usar un mango con tuerca, como se muestra en la fig. 28b.

El cimiento debe ser lo suficientemente grande para dar un mínimo de 2.5 in de espacio libre alrededor de la orilla de la tuerca. Estos deben ser la proyección adecuada de el perno de anclaje alrededor del cimiento, para permitir a) el grueso de la argamasa clara o empaque seco, o la esgraderera, la cual es del grueso de la base de la maquinaria, y b) el grueso de 1 ó 2 tuercas. La maquinaria susceptible a vibraciones, deberá tener dos tuercas. La argamasa debe ser del tipo que no se contrae, y colocada sólidamente bajo la base de el equipo, después de ser levantada con un calce.

El diámetro de los mangos es alrededor de 1 in más grande que el perno de anclaje, y 6 a 16 in de largo dependiendo del tamaño del perno. El novo para el perno en el fondo de el mango es 1 lo in, más grande que el diámetro del perno.

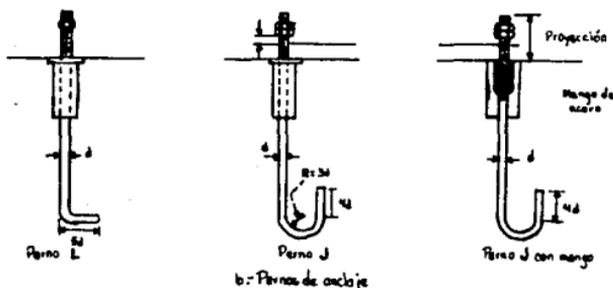
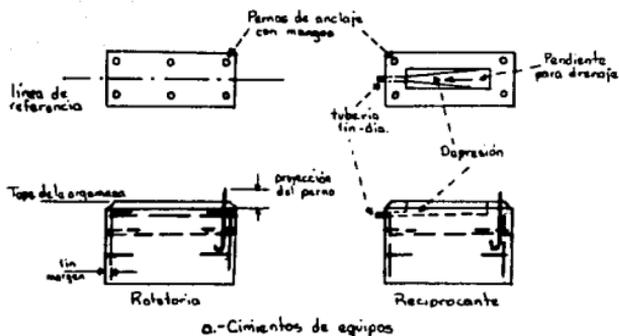


FIG. 23. CIMIENTOS + PERNOS DE ANCLAJE PARA MAQUINARIA ROTATORIA + RECIPROCANTE.

Los pernos de anclaje tipo J son para dar más resistencia a la salida, que los tipo L (fig. 23b). El largo incrustado de el perno de anclaje es determinado por la fuerza de unión de el perno a el concreto, de manera que de una tensión equivalente en el perno, solamente la porción del concreto que es localizada monolíticamente, debe considerarse en el cálculo de la longitud incrustada para el perno de anclaje.

En muchos casos el fabricante del equipo establece el número y tamaño de los pernos de anclaje que son adecuados para resistir todas las fuerzas ejercidas por el equipo.

CONSTRUCCIÓN DE MUROS Y TECHOS PARA EDIFICIOS DE PLANTAS Y PROCESOS.

Al ingeniero químico le conciernen muchos tipos de recintos, porque las plantas de proceso pueden involucrar miles de pies cuadrados de área de un piso, requiriendo cercas, separaciones y techos para proteger el equipo y el personal.

Muchas unidades generan humos nocivos, polvos, vapores inflamables, y otros contaminantes atmosféricos indeseables, mientras que algunos requieren facilidades para la limpieza del ambiente. Ejemplos:

- * Una molineta de rocas o pulido puede perturbar áreas adyacentes por el ruido excesivo y vibraciones.
- * Los talleres para reparar instrumentos deben ser aislados y libres de polvo.
- * El área de almacenamiento para materiales altamente combustibles deben ser separados de los cuartos en que labora personal.

Construcción de muros.

Las industrias requieren de un rango amplio de tipos de muros, como se muestra en la fig.24. Algunos son estéticos y decorativos, como frecuentemente son los sitios públicos, salas de conferencia, y oficinas ejecutivas. En el otro extremo, tenemos simples separaciones de madera laminada, sin pintar (fig.24a), las cuales son frecuentemente usadas para los encargados en sus oficinas y cuartos de despacho. Algunos muros deben resistir la humedad como en los laboratorios y gavetas o cuartos de procesos húmedos. Los muros impermeables y herméticos son requeridos para el área de control de calidad, y de limpieza. Otros muros resisten la corrosión, como en un almacén químico y cuartos de proceso. Los cuartos a prueba de ruido separan el ruido de las áreas de producción de los espacios de ambientes calmados, como los cuartos de control.

Protección contra el fuego.

Uno de los propósitos especiales de una pared es el control y extinción del fuego, y suministrar una salida de seguridad desde un edificio por un pasillo exterior. En edificios altamente ocupados, la ley de seguridad requiere que todos los corredores de salida sean construídos con muros y techos resistentes al fuego. Estos usualmente tienen una resistencia al fuego de 1 o 2 horas, y se determina por pruebas específicas, las cuales requieren que un muro mantenga su fuerza, y un límite de temperatura en el lado expuesto, para un mínimo de tiempo.

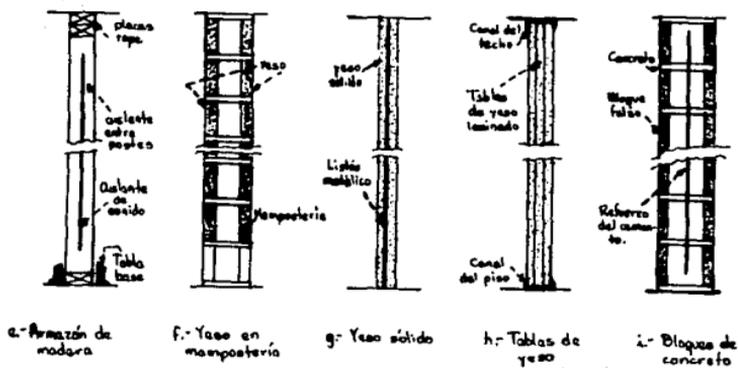
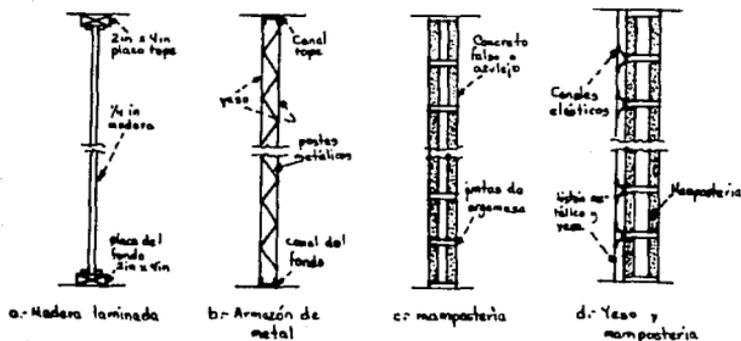


FIG. 24. DIFERENTES TIPOS DE MUROS.

Los muros exteriores, adyacentes a la línea de propiedad de otros edificios, deben tener una resistencia al fuego de 1 a 4 horas, dependiendo de la distancia, tamaño y ocupación del edificio; un muro resistente al fuego se muestra en la fig.24g.

Componentes típicos de una pared.

Un muro típico o separación es construido de diferentes componentes: La forma estructural (que da la fuerza necesaria), la superficie (separa áreas adyacentes), y el acabado, adaptación y accesorios. Los muros son definidos como de apoyo y de no apoyo, un muro de no apoyo (frecuentemente se refiere a una separación) soporta solamente su peso, un muro de apoyo soporta otras cargas además de su peso.

Los muros permanentes de poco peso son hechos de un amplio rango de materiales. El más común y barato es el muro de armazón de madera (fig.24e), consistente de postes de madera de 2in x 4in espaciados 16in desde el centro y tienen una placa de fondo de 2in x 4in y doble placa en el tope de 2in x 4in. Estos muros son reforzados con tiras de madera o acero.

Un sistema de armazón similar incombustible usa postes de metal (fig.24b), estos se hacen de canales de acero forjado en frío de 10 a 18 gage, y espaciados 24 in en el centro. Los postes de metal son sujetos a canales de metal corridos en el piso y la parte superior. Los postes de metal son clasificados como de apoyo y de no apoyo.

Materiales para la superficie de los muros.

Los materiales superficiales de un poste de muro de madera o metal, pueden ser metal o listones de yeso, tablas de yeso, o metal con listones de cemento portland para lugares húmedos. El emplastado de cemento en un muro exterior también es conocido como estuco. Los accesorios para un muro emplastado son: esquinas, juntas de expansión, marcos de puertas y ventanas, base de quarnición.

Mampostería y muros exteriores.

La construcción de muros pesados, como el que se muestra en la fig.24f, incluye concreto sólido, argamasa, bloques de concreto huecos, y ladrillos de mampostería. Cada uno de estos suministra una permanente y alta resistencia al fuego y son muros no corridos, tienen una fuerza estructural relativamente alta. Estos muros también ofrecen buena aislación con respecto al sonido y térmico, por su densidad y grueso.

Los muros de bloques de concreto son más vulnerables a la humedad, que el concreto sólido o ladrillos y deben ser protegidos por un impermeable o emplastado de cemento, que es colocado en el lugar expuesto a la humedad.

Para áreas extensas de producción o edificios de acero laminado, los muros exteriores deben consistir de columnas de acero y vigas corrugadas en los muros que soporten, acero acanalado o entablado de aluminio. Este tipo de entablado tiene poca resistencia térmica o al sonido a menos que se coloquen paneles en el interior de la superficie. Los paneles aislados recubiertos de metal, pueden ser usados en lugar del entablado corrugado. Estos paneles son sujetos a durmientes de acero con tornillos taladrando al mismo, pernos u otros sujetadores. Los edificios pre-dirigidos típicamente usan esta clase de construcción, la mayor diferencia en los muros para un edificio pre-dirigido y un edificio fábrica, es que los durmientes son hechos de acero forjado en frío en el primero y acero rolado en caliente en el segundo.

El entablado plano, corrugado o acanalado hecho de plástico o plásticos reforzados, pueden ser instalados a intervalos para dar luz natural al edificio, sin usar ventanas convencionales.

En muchos casos, el entablado es prepintado y no requiere pintarse en muchos años; para resistir la corrosión, las hojas de acero son galvanizadas y las hojas de aluminio son anodizadas.

Separaciones interiores.

Se debe poner atención en estas, para dar la utilidad necesaria, cuando se seleccionan los muros interiores o separaciones. Éstos deben permitir los conductos eléctricos, unión de los cuartos, receptáculos convenientes y cajas de apagadores, el espacio para tuberías, ductos, aislación y plomería, si se requieren.

Las separaciones para laboratorios y alternado de cuartos, son usualmente construidos de acero galvanizado y bonderizado, y tienen un acabado esmaltado en caliente; tales separaciones son soportadas desde el muro, piso o techo.

Las separaciones en lugares de almacenamiento de partes de repuesto puede ser de malla de alambre; éstas son de alambre de acero de 18 gage que es entrelazado dentro de una malla en forma de rombo y sujeta a armazones de canales de acero forjado en frío. Estas separaciones son disponibles desde 7 a 20 ft de alto, puertas y ventanas de servicio corredizas y de compás, son también disponibles en malla de rombo.

Las separaciones para áreas de oficina son usualmente móviles, sus componentes consisten de postes y paneles rellenos; los postes pueden ser de madera, aluminio extruido, o armazones de acero. Los paneles rellenos son de madera laminada (fig.24a), madera dura templada, tablas de yeso, hojas de acero o vidrio. Las separaciones se hacen a alturas estándar en un rango de 44 a 84 in. Normalmente, las separaciones móviles no se extienden hasta el techo, y solamente dan una aislación visual y algún grado de reducción del sonido, mientras que no obstruyen el aire acondicionado y la iluminación del cuarto.

Una breve lista de aspectos a considerar para seleccionar un muro o separación se dan en la tabla I.

TABLA I. CARACTERISTICAS PARA SELECCIONAR UN MURO.

- * Fuerza: de impacto, resistencia, cargas.
- * Protección contra el fuego: incombustible o resistente al fuego.
- * Aislación térmica: radiación, conductiva o convectiva al calor.
- * Resistencia a la humedad: periódica o continua.
- * Resistencia a la corrosión: ácida o alcalina.
- * Aislación visual.
- * Costo inicial.
- * Costo de mantenimiento.

Techos y sus materiales.

Un techo de edificio (fig.25) sirve para muchos propósitos. Es una estructura con sistema armado carga-apoyo; una cubierta o cercado; un sistema de aislación; una cubierta impermeable; o una plataforma de trabajo o para montaje equipo.

Así como un sistema de armado, el techo debe soportar el peso muerto del techo, cargas vivas de trabajadores y sus materiales, cargas suspendidas de grúas, cargas de cables a ventiladores, torres de enfriamiento, equipo de aire acondicionado, tanques de almacenamiento, tuberías y otros equipos mecánicos. El techo debe resistir además las fuerzas horizontales del viento y temblores, unido siempre a los muros del edificio.

Los principales elementos de un sistema de techo armado son: durmientes, vigas, barras inclinadas, cabrios, correas, refuerzos y puntales de acero.

Así como una cerca o cubierta, el techo protege el área interior de el ambiente, también previene la contaminación generada en la planta, de provocar una molestia a el vecindario, sin embargo, la cubierta debe ser hermetica al polvo, y debe suministrar una base inclinada para la membrana impermeable, y servir como un diafragma estructural para distribuir las fuerzas de cizallamiento a las paredes del edificio.

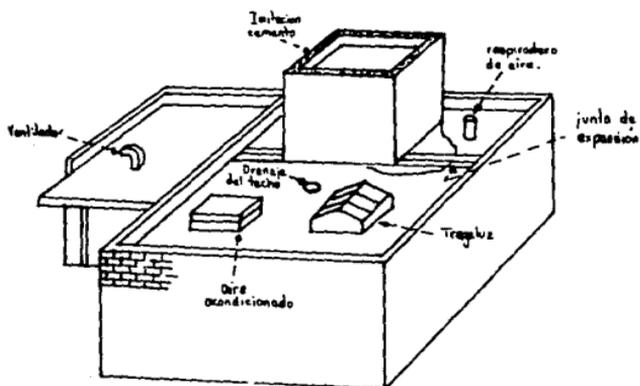


FIG. 25. DETALLES DEL TECHO DE UN EDIFICIO.

La cubierta también deberá resistir las cargas del viento, las fuerzas de levantamiento, y transmitir estas fuerzas a los miembros del techo. En construcciones con madera, puede hacerse una cubierta laminada, o sólida de teclas con 1 in de grueso instaladas en la diagonal. Las cubiertas también pueden ser de yeso ligero o concreto vermiculado.

Aislación del techo

Los sistemas de aislación se muestran en la fig. 2a, y pueden ser parte de la cerca o unido al tope de la cerca, como un material mineral ligero prefabricado, como la perlita, veso o vermiculita; o sujeto a la superficie interior en forma de listones o cubiertas de fibra de vidrio. Otras aislaciones sobre la cubierta incluyen: Espumas plásticas, tablas de fibra orgánica, o de fibra de vidrio rígida.

Una función importante del techo es la impermeabilidad de la cubierta, que previene de la entrada de humedad de la lluvia. La parte más crítica de esta cubierta, son las uniones entre los diferentes planos y materiales, como se muestra en la fig. 2ob. Estas incluyen intermitentes y contraintermitentes a paredes parapeto, aberturas, penetraciones, aleros e inclinaciones.

Además se requiere, de un metal de protección en el tope de las paredes parapeto, pendientes y juntas de expansión. Los intermitentes dan flexibilidad e impermeabilidad a todas las juntas, y son hechos usualmente de fierro galvanizado, cobre o tiras de asfalto saturado con fieltro o fibra de vidrio; todos los metales para intermitentes deben permitir la expansión y contracción, sin rupturas del material del techo, esto se hace para aislar la membrana del techo de el metal intermitente.

Membranas de techado.

Mínimo hay tres tipos de membrana, que se usan actualmente: La construida en alto, capa simple y elastómerica.

El material para techar consiste de tres o más capas de asfalto saturado con fieltro, pegado siempre con una muñeca de trazo de asfalto o una mezcla de brea-hulla. La capa final de fieltro es cubierta por un mineral granulado, aplicado en forma de una capa pesada, o por una capa de mineral granular, como con 1 ó 2 capas de grava o escoria. La grava o escoria es fijada en una capa gruesa de asfalto o de brea-hulla.

El techado de capa simple consiste de hojas de membranas plásticas, que son unidas o pegadas siempre, con el empalme, de forma que sea una cubierta continua. El intermitente es del mismo material que el material para techar.

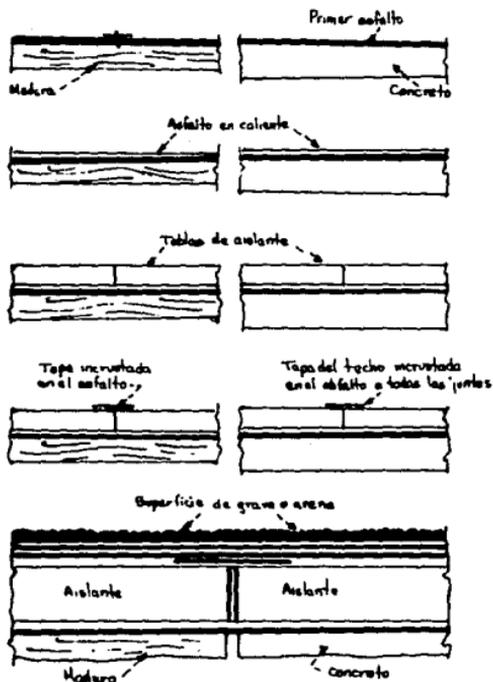


FIG. 26. SISTEMAS DE AISLACION.

El material elastómero para techar es aplicado en forma líquida, y endurecido hasta que forma una aislación esponjosa o una membrana fuerte e impermeable. El intermitente es usualmente del mismo material. El endurecimiento del elastómero, en el mismo lugar también actúa como una aislación térmica.

CAPITULO III

ASPECTOS BASICOS DE CORROSION Y SELECCION DE MATERIALES.

La corrosión es un factor muy importante en las plantas de procesos químicos, y le corresponde al ingeniero químico controlarla, para ello debe saber como reconocer la corrosión, que la causa, como se mide, técnicas de inspección y selección de materiales, como interpretar la información que se tenga de la corrosión y donde obtener ayuda.

Fundamentos de corrosión.

Por definición, la corrosión es el deterioro que ocurre cuando un metal reacciona con el ambiente, y puede presentarse en diferentes formas. A continuación se presentan algunas consecuencias directas e indirectas, que son resultado de la corrosión, provocando daños económicos:

- * Reemplazo de equipo corroído.
- * Un sobrediseño para permitir la corrosión.
- * Mantenimiento preventivo.
- * Pese del equipo, debido a fallas provocadas por la corrosión.
- * Contaminación del producto.
- * Baja eficiencia, el sobrediseño y la corrosión provocan, en un intercambiador de calor, una disminución en la velocidad de transferencia de calor.
- * Disminución en el valor del producto, por contener material corroído.
- * Dificultad para usar otros materiales.
- * Daños en el equipo adyacente, cuando ocurre la falla.

Otras consecuencias son de tipo social:

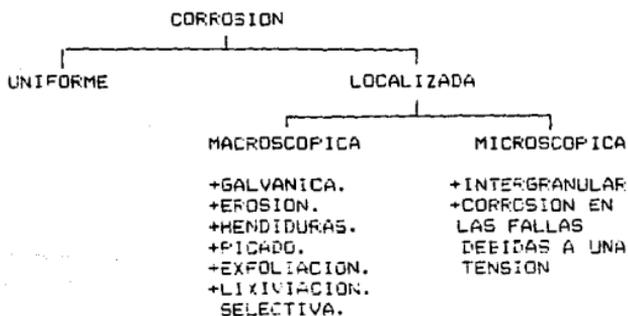
- * Seguridad, una falla repentina puede causar fuego explosivo y producir productos tóxicos.
- * Sanidad, la producción debida al escape del producto en equipo corroído o a la corrosión del mismo.
- * Agotamiento de recursos naturales: metales y aceites usados en la manufactura.
- * Apariencia, e. material corroído no es agradable a la vista.

Formas de corrosión.

La corrosión ocurre en diferentes formas, y su clasificación se basa en tres diferentes factores:

- (1) Naturaleza de la corrosión. La corrosión puede ser clasificada como "húmeda" o "seca", en la primera interviene algún líquido o mezcla, y la corrosión seca involucra una reacción con gases a altas temperaturas.
- (2) Mecanismo de corrosión. Puede ser electroquímica o química.
- (3) Apariencia del metal corroído. La corrosión es uniforme cuando se presenta a lo largo de toda la superficie; o localizada si existen solo algunas áreas afectadas. Dentro de la corrosión localizada, tendremos una corrosión a nivel macroscópico y un ataque local a nivel microscópico, esta clasificación se muestra en la fig.1.

FIG.1. LAS DIFERENTES FORMAS DE CORROSION



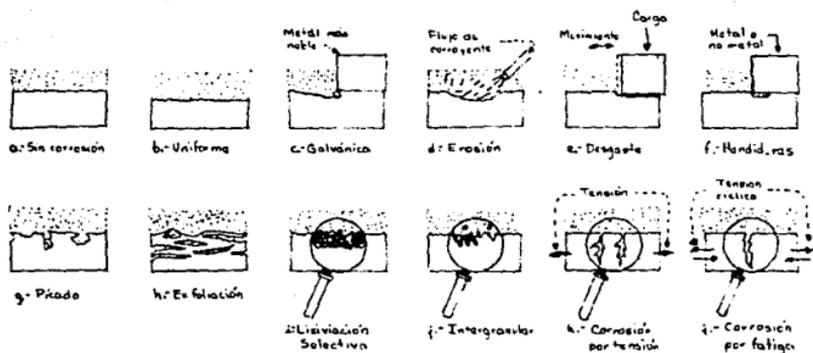


FIG.2. TIPOS DE CORROSION

El ataque uniforme sobre grandes áreas en la superficie del metal, es el más común y puede ser seca o húmeda, química o electroquímica. Para su control se usan métodos de protección y una buena selección de materiales, y para evitar una falla inesperada se requiere de una inspección regular, fig 2b.

La corrosión galvánica ocurre cuando dos metales en contacto son expuestos a una solución conductora (o conectados por un conductor eléctrico). Si existe una diferencia en el potencial eléctrico, entre los diferentes metales, habrá un flujo de corriente que provocará la corrosión de uno de los metales. Si la diferencia de potencial es grande, la probabilidad de una corrosión galvánica aumenta. La corrosión galvánica puede reconocerse por el incremento de la corrosión en la junta de los dos metales, fig.2c.

Cuando hay movimiento de un corrosivo sobre la superficie de un metal, se incrementa la velocidad de ataque debido al desgaste mecánico y a la corrosión, este ataque es llamado erosión-corrosión. Generalmente tiene una apariencia de un fondo blanco con huecos poco profundos (como se muestra en la fig.2d). el ataque se presenta cuando hay condiciones de velocidades muy altas, turbulencia, etc. Es frecuente encontrarla en los impulsores de las bombas, agitadores y tuberías. La cavitación y el desgaste por corrosión son formas de erosión-corrosión. La cavitación es causada por la formación y colapso de burbujas de vapor en la superficie de un metal. La

alta presión producida por este colapso puede deformar el metal o remover la película protectora, etc. El desgaste por corrosión ocurre cuando el metal resbala sobre otro y causa un daño mecánico en uno o en ambos metales (fig.2e).

Las condiciones ambientales con el transcurso del tiempo, pueden hacer que una grieta se convierta en una superficie abierta. En ambientes agresivos puede desarrollarse una corrosión local en la hendidura (fig.2f). Las hendiduras más comunes son en los remaches, pernos, en el seno de las juntas, etc. Este tipo de corrosión se atribuye a alguna de las siguientes causas:

- a) Cambio de acidez en la hendidura.
- b) Falta de oxígeno en la hendidura.
- c) Presencia de iones de especies nocivas en la hendidura.
- d) Agotamiento del inhibidor en la hendidura.

La corrosión por picado, es la formación de cavidades, y prácticamente la superficie no sufre corrosión; estas cavidades pueden tener varias formas (fig.2g), y su crecimiento dependerá de la corrosión. Este tipo de corrosión puede considerarse como una corrosión del tipo que ocurre en las hendiduras. Para minimizarla es deseable tener un metal cuya superficie sea homogénea y limpia.

La exfoliación es una corrosión debajo de la superficie, aún cuando esta se vea limpia, la corrosión se extiende por debajo, en forma de láminas (fig.2h). El ataque se reconoce porque el material presentará una apariencia escamosa y puede ser combatida con un tratamiento a base de calor.

La lixiviación selectiva (algunas veces llamada separación) es la remoción de un elemento en una aleación, el ejemplo más común es la remoción de zinc de una aleación cobre-zinc. La corrosión es debida a un proceso largo de separación, porque se producen poros en el metal como consecuencia de sus propiedades mecánicas (fig.2i).

Características de las fallas por corrosión-tensión:

- + La corrosión-tensión requiere de una tensión y un esfuerzo. Bajo un esfuerzo límite no ocurre la ruptura.
- + La ruptura tiene una apariencia de ser quebradiza. Las fallas mecánicas de algunas aleaciones, en ausencia de un corroyente, son generalmente dúctiles.
- + La tensión-corrosión depende de la condición metalúrgica de la aleación.
- + Son pocos y específicos los ambientes que pueden causar una ruptura en aleaciones.

- + La tensión-corrosión en ambientes considerados suaves, es decir una velocidad de corrosión uniforme, puede causar una ruptura.
- + Pueden pasar largos períodos de tiempo, antes de que la ruptura sea visible.

CORROSION ELECTROQUIMICA.

Los corroyentes atacan los metales y de este modo crean en sus superficies muchas celdas galvánicas localizadas. El tipo de corrosión dependerá de la naturaleza del metal y del corroyente, y su magnitud del potencial eléctrico.

La corrosión en el sentido electroquímico ocurre cuando un metal sólido es oxidado, a un ion del metal con carga positiva en solución; esto sucede en las áreas llamadas ánodos. El resultante exceso de electrones pasa através de la superficie del metal (cátodo) donde los electrones son removidos por la reacción de reducción. El corroyente debe contener especies que puedan ser reducidas en el cátodo y iones capaces de completar el circuito eléctrico entre el ánodo y el cátodo (el corroyente puede ser un electrólito). El flujo de corriente va através de la solución del ánodo al cátodo; la fuerza que impulsa el flujo de corriente, es la diferencia del potencial eléctrico.

La corrosión electroquímica sólo sucede, en condiciones tales que cumplan con las leyes termodinámicas (ec.1, al final del capítulo). Ejemplo: para el fierro en una solución ácida:

$$E = E [H^+/H_2] - E [Fe/Fe^{++}]$$

$$E = 0 - (-0,440) = +0,440 \text{ v}$$

Como E es positiva, ΔG es negativa y la reacción es factible de suceder.

POLARIZACION

Cuando hay un flujo de corriente, entre el ánodo y el cátodo, hay un cambio en los potenciales de ambos; este cambio es llamado polarización. La polarización reduce la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo como se muestra en la fig. 3 (ver ec. 2 al final del capítulo). Para un flujo de corriente dado, el cambio puede ser pequeño o grande como se muestra en la fig. 4a. Cuando el grado de polarización se incrementa, la velocidad de corrosión decrece. La polarización en el ánodo puede ser tan grande o tan pequeña como en el cátodo (fig. 4b y 4c).

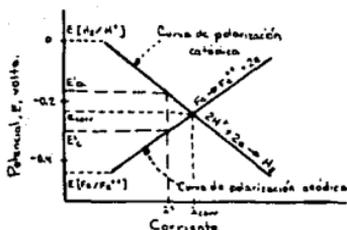


FIG. 3 POLARIZACION.

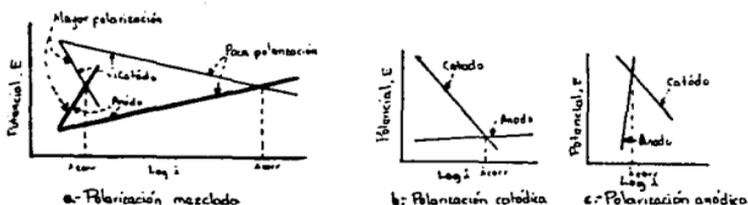


FIG. 4. EFECTOS DE LA POLARIZACION DE LOS ELECTRODOS.

Datos de polarización para obtener la velocidad de corrosión.

La velocidad de corrosión la podemos calcular usando las leyes de Faraday si conocemos la corriente de corrosión; la medida directa de esta corriente no es lo más deseable, porque este flujo de corriente es entre muchos y pequeños ánodos y cátodos en la superficie del metal. Sin embargo, podemos medirla indirectamente.

Si nos referimos a la fig. 3, podemos ver que para obtener el valor de la corriente de corrosión, solo necesitamos conocer el potencial de corrosión y las curvas de polarización tanto del ánodo como del cátodo. Sin embargo, no tenemos información para construir las curvas de polarización, para hacer esta medición necesitamos un equipo como el que se muestra esquemáticamente en la fig. 5.

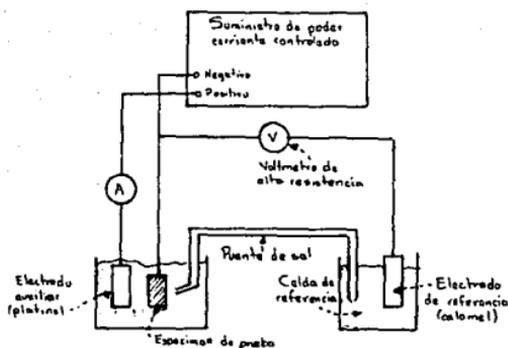


FIG. 5. CIRCUITO PARA MEDIR LA POLARIZACION.

Tomando como ejemplo el sistema de la fig. 3 (hierro en ácido clorhídrico), y usando el circuito de la fig. 5, en un punto cualquiera de la superficie del hierro tendremos un potencial de -0.5V en vez de un potencial de corrosión de -0.2V porque este flujo de corriente es entre el electrodo auxiliar inerte y el hierro; y será el mismo a lo largo de toda la superficie del metal, este flujo es el que existe entre el ánodo y el cátodo, por lo tanto el potencial de corrosión es de -0.8V . Si aplicamos un potencial de -0.75V podremos obtener otra lectura de la corriente, y repitiendo este procedimiento a lo largo de un rango de potenciales, obtendremos las curvas de la fig. 6.

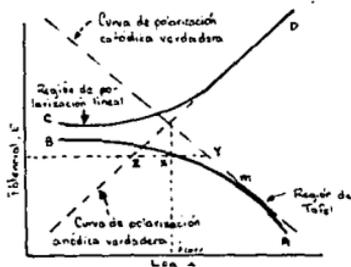


FIG. 6. CURVAS DE POLARIZACION

Cálculo de la velocidad de corrosión.

Existen dos métodos para calcular la velocidad de corrosión: la extrapolación de Tafel y la polarización lineal. La extrapolación de Tafel se basa en el factor que se obtiene para la región del potencial de corrosión, la curva experimental se superpone a la verdadera curva de polarización (fig.6) y muestran una pendiente constante. Esta es llamada región de Tafel, y la pendiente, pendiente de Tafel. Si la línea que representa a la región de Tafel es extrapolada encontraremos el potencial de corrosión cuando se cruce con la curva de polarización (usualmente del cátodo), entonces habremos encontrado el valor de i_{cor} , que transformaremos a velocidad de corrosión por medio de la ec. 3 al final del capítulo.

La principal desventaja de este método es identificar la región de Tafel, sin embargo, esta dificultad se libra con el método de polarización lineal en el cual se toma en cuenta que cuando una corriente externa es aplicada el potencial se desvía ligeramente, justo cuando llega a la condición de corrosión, esta área se muestra en la fig. 6, pero se ve con detalle en la fig.7.

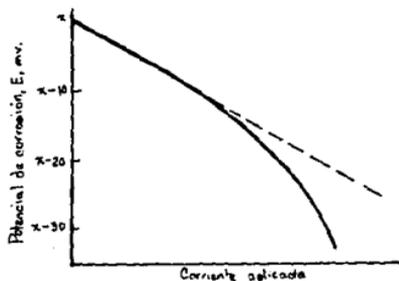


FIG.7. POLARIZACION LINEAL.

La pendiente de la curva (potencia/corriente aplicada), es constante y pequeña hasta el potencial de corrosión. Esta pendiente, $\Delta E/\Delta I$, tiene unidades de resistencia, por ello esta técnica es llamada algunas veces resistencia a la polarización. En la fig.7 tenemos la curva del cátodo, pero el ánodo presenta una curva semejante. Para el cálculo numérico ver ec. 4 al final del capítulo.

PASIVIDAD.

Hay algunos metales que se dice son pasivos en ciertos ambientes, porque muestran una baja velocidad de corrosión, cuando termodinámicamente se esperaría que fueran corroídos rápidamente. Normalmente estos metales, son susceptibles de ser corroídos rápidamente si cambiamos las condiciones ambientales. Algunos ejemplos de estos metales son: el hierro, cromo, titanio, níquel y aleaciones que contienen estos metales.

La pasividad es generalmente, asociada con una oxidación media y la formación de una película protectora de óxido, pero es el resultado de una reacción continua entre el metal y el ambiente.

Los metales que no presentan pasividad en algún medio, presentan una curva de polarización del ánodo como se muestra en la fig. 8a, si mostrará pasividad en el mismo medio la curva de polarización sería como la de la fig. 8b, en la cual podemos ver un rango de potencial (AB) en el cual hay una alta polarización, esta es la región pasiva.

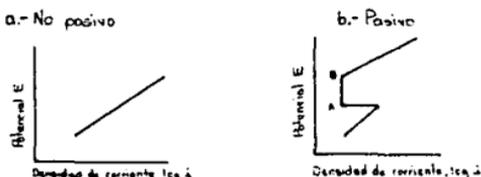


FIG. 8. PASIVIDAD EN LA POLARIZACIÓN ANODICA.

En la fig. 9 se muestran las curvas de polarización del ánodo, y las del cátodo las cuales tienen tres grados diferentes de polarización, este grado determinará la corriente de corrosión, que a su vez depende de la posición de la curva de polarización del cátodo. En el caso 1, tendremos una densidad de corriente de corrosión i_c , en el caso 2, sin embargo, observamos que la corriente de corrosión i_c , decrece, porque cruza la curva de polarización del ánodo en 3 puntos X, Y y Z. Y es eléctricamente inestable; en esta situación la corrosión puede ser muy baja (X) o muy alta (Z), esto es una desventaja de la pasividad, pues al menor cambio del ambiente, hay un cambio drástico en la corrosión.

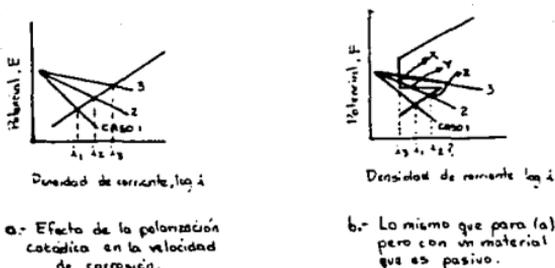


FIG. 7. EFECTOS DE LA POLARIZACIÓN CATÓDICA Y LA PASIVIDAD EN LA CORRIENTE DE CORROSIÓN.

Aplicación de los datos de polarización anódica.

A través de los datos de polarización podemos saber la velocidad de corrosión de un metal en un medio dado, estos datos también nos sirven para evaluar la resistencia a la corrosión por picado de algunas aleaciones.

Los diagramas de polarización anódica son una útil herramienta, para estudiar los efectos que pueden tener los cambios en el ambiente o el material, en la velocidad de corrosión. Y en la base de los métodos de control y en algunos casos la razón de la necesidad de un control.

MEDICIÓN DE LA CORROSIÓN EN PLANTAS DE PROCESO.

Antes de seleccionar una prueba o una técnica para medirla, es importante definir la razón para hacerlo, para poder seleccionar la mejor; las principales razones para medir la corrosión son:

- + La corrosión ocurre directamente en la planta.
- + Evaluar materiales y efectos ambientales para futuras aplicaciones.
- + Evaluar la calidad de un lote específico de material de comportamiento conocido.
- Estudio de mecanismos de corrosión.

Las pruebas que satisfacen estas necesidades pueden dividirse en tres grandes grupos:

- (1) Pruebas de servicio en corrientes de proceso actuales o ambientes naturales.
- (2) Pruebas de servicio simulado, en las cuales se reproduce el servicio en que se usará.
- (3) Pruebas aceleradas, en las cuales la prueba media puede o no estar relacionadas con el servicio. Y a su vez se dividen en:
 - a) Pruebas de control de calidad.
 - b) Pruebas de servicio simulado.
 - c) Estudio de mecanismos.
 - d) Pruebas de servicio simulado-acelerado.

* Pruebas de pérdida de peso.- Son las más comunes para medir la corrosión, en la cual una pieza metálica es medida, pesada y expuesta al corroyente por un tiempo conocido, después se limpia de los productos de la corrosión y se vuelve a pesar. (ver ec. 5 al final del capítulo).

* Pruebas muestra y sus apoyos.- No existe un tamaño ni forma estándar para la pieza, usualmente son de 10 a 50 g, y es preferible que tengan una gran área superficial. La preparación de la superficie varía con la prueba deseada, pero lo más común es una superficie pulida, sin bordes y limpia. Es conveniente sujetar la pieza firmemente durante la prueba, mediante una técnica adecuada, tanto en el laboratorio como en la planta. Posteriormente se somete al agente corroyente; cada espécimen debe ser cuidadosamente examinado, antes y después de la prueba y nuevamente después de limpiarla, buscando evidencia de corrosión localizada. Si esto sucede el cálculo de la velocidad de corrosión no será representativo, y deberán usarse métodos más específicos.

La medida de la corrosión localizada presenta dificultades a continuación presentamos algunos métodos:

La técnica usada para la detección de corrosión intergranular dependerá de la intensidad del ataque; un ataque significativo puede presentarse y no ser visible a simple vista, en ese caso con una amplificación de 10 a 20 veces, se puede observar el problema. Cuando el ataque es tan severo que la superficie se desgrana, se recomienda el método de pérdida de peso para evaluar la corrosión, si los granos son muy pequeños quedarán retenidos en la superficie de la muestra y el método no funcionará, a menos que los granos se puedan retirar junto con el corroyente.

* **Pruebas de resistencia eléctrica.** - Cuando los métodos de pérdida de peso no son aplicables, se emplean las técnicas de resistencia eléctrica:

Si la muestra para la prueba es un alambre fino o una tira delgada, su resistencia eléctrica se incrementa, porque la corrosión disminuye su sección transversal, por lo tanto una medida continua y periódica de la resistencia en las terminales de un espécimen, puede usarse para determinar la corrosión.

Las ventajas de este método son:

- (1) La medida de la corrosión puede hacerse sin tener que observar o remover la pieza.
- (2) Las medidas pueden hacerse rápidamente en unos minutos o continuamente.
- (3) Puede usarse como un indicador del proceso, cuando las reacciones son completas, si la velocidad de corrosión depende del grado de reacción.
- (4) El corroyente no será necesariamente un electrolito.
- (5) Pueden detectarse velocidades de corrosión bajas, que por el método de pérdida de peso emplearía tiempos muy grandes.
- (6) Los instrumentos empleados son comerciales.

Limitaciones:

- (1) Para poder detectar, la corrosión debe ser uniforme, por ello no resultará satisfactorio cuando la corrosión es localizada, aunque para corrosión intergranular sí sirve.
- (2) Las muestras son más elaboradas que las empleadas en otros métodos.
- (3) Los resultados pueden ser engañosos si se forman depósitos conductores en la muestra.

* **Corrosión por tensión.** - Este método proporciona datos para la evaluación de la corrosión por tensión en varios medios. Las pruebas para conseguir la corrosión por tensión con muestras normales, se hace generalmente exponiéndolas a varias condiciones de esfuerzo, estas muestras se inspeccionan a intervalos buscando roturas superficiales, si no aparecen, entonces debemos hacer pruebas destructivas.

Existen dos problemas al hacer esta prueba, y son:

- (1) Las pruebas son difícilmente reproducibles, debido a que las condiciones para la ruptura son muy específicas.
- (2) Requiere de mucho tiempo el lograr que aparezca la rotura y se desarrolle, incluso varios años.

Debido a esta última desventaja, se emplean muestras a las cuales se les ha practicado una rotura deliberada, a fin de reducir el tiempo y solo estudiar el desarrollo de la misma.

Pruebas de corrosión en soldaduras.

Una soldadura puede presentar diferentes tipos de corrosión como se muestra en la fig.10.

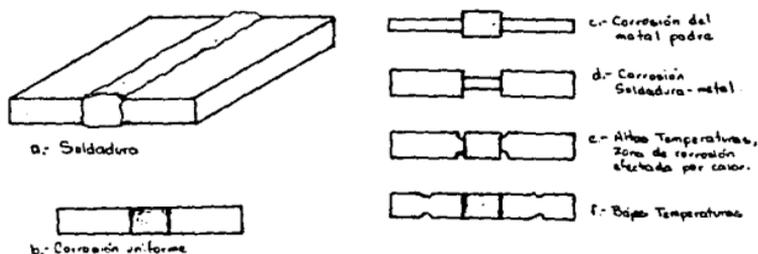


FIG.10. TIPOS DE CORROSION EN SOLDADURAS.

Usualmente la corrosión es uniforme sobre la superficie entera, es decir, la soldadura será atacada en la misma forma que el metal padre (fig.10b), pero en algunos casos la soldadura es susceptible a varios tipos de ataque localizado debido principalmente a dos causas:

- Cambios metalúrgicos debidos al calor de la soldadura.
- Corrosión galvánica entre la soldadura y el metal padre.

Si se presenta corrosión localizada (fig.10d a 10f) el método de pérdida de peso puede dar resultados engañosos. El peso total perdido es promediado sobre el total de la superficie, el total calculado de velocidad de corrosión será menor cuando el ataque sobre la soldadura sea más severo. (fig.10d).

Cualquier prueba de corrosión consistirá de tres pasos, la preparación de la muestra, la exposición de la muestra al corroyente y evaluación de la muestra expuesta.

Oxidación a altas temperaturas.

Otra forma común de corrosión es la oxidación, entendiendo esta como una reacción con gases a las altas temperaturas, estos gases no necesitan tener oxígeno, ya que el término incluye carburización, sulfitación, etc.

Las medidas empleadas en los cambios de peso para estas muestras son similares a los usados en corrosión por líquidos. La superficie fina tiene mayor importancia en estas pruebas, así como la geometría de la muestra.

Las pruebas de oxidación toman más tiempo que las de corrosión por líquidos, porque la velocidad de deterioro es menor, debido a que toma más tiempo una velocidad de ataque constante.

La evaluación de una muestra oxidada es siempre la mayor parte de la prueba. Los óxidos formados se examinan para estudiar su morfología y su composición.

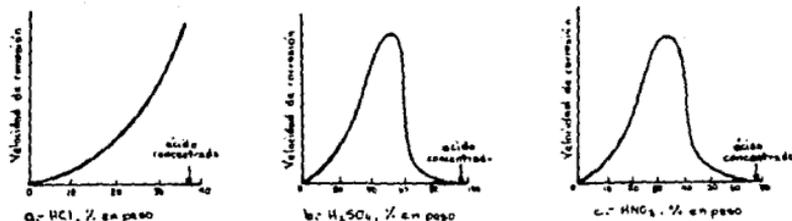
CONTROL DEL PROCESO Y DE LA CORROSION.

Existen cuatro formas de prevenir y controlar la corrosión:

- (1) Control de las variables de proceso.
- (2) Diseño de ingeniería.
- (3) Protección.
- (4) Selección de materiales.

En esta sección describiremos las variables de proceso más comunes que influyen en la corrosión, que son:

a) Concentración del constituyente mayor. La velocidad de corrosión de un material dado, usualmente se incrementa cuando la concentración del corroyente se incrementa, como se ve en la fig.11. Sin embargo, la corrosión no siempre se incrementa con la concentración y este efecto dependerá del rango de concentración. Como se muestra en la fig.12.



NOTA: las curvas de velocidad de corrosión no son iguales, para cada ácido. Todas son a temperatura ambiente

FIG.11.EFECTO DE LA CONCENTRACION DE DIFERENTES ACIDOS EN LA CORROSION DEL FIERRO.

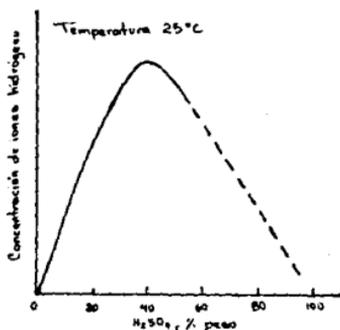


FIG.12 EFECTO DE LA CONCENTRACION DE HIDROGENO EN UNA SOLUCION DE ACIDO SULFURICO.

En muchos procesos es posible tener un control sobre la composición del producto para minimizar la corrosión, por ejemplo, eliminar el corroyente de la reacción.

b) Efectos de las impurezas.- La presencia de impurezas en un corroyente puede ser buena o mala, para permanecer en el punto de corrosión. Los efectos benéficos dependen de las mismas reglas para inhibidores que se discutirán más adelante.

c) Temperatura.- El control de la temperatura es uno de los mejores métodos para reducir la corrosión. Un incremento en la temperatura usualmente incrementará la velocidad de corrosión, salvo algunas excepciones que son cuando decrece el contenido de oxígeno de la solución.

d) pH.- El pH es un factor muy importante en la corrosión y control de la misma. Una de las aplicaciones más comunes es la neutralización de soluciones ácidas con álcalis y reducir así su corrosividad.

e) Aereación.- La presencia de oxígeno puede o no incrementar la velocidad de corrosión, su influencia puede ser mejor discutida si dividimos a los metales en dos categorías: los que muestran pasivación y los que no la presentan.

Los metales que no presentan pasividad generalmente son atacados más rápidamente cuando el contenido de oxígeno en la solución se incrementa, y a la inversa para los que se encuentran en el estado pasivo.

f) velocidad de flujo.- Un aumento en la velocidad del movimiento relativo de una solución corrosiva en una superficie metálica tiende a acelerar la corrosión. Este efecto se debe al índice más alto con que los productos son retirados y a que las sustancias oxidantes llegan a la superficie.

g) Inhibidores de corrosión.- Un inhibidor es una sustancia que reduce la corrosión y que están presentes en cantidades relativamente pequeñas en el corroyente. Son clasificados de muchas formas: por su composición, forma o mecanismo de acción. Aquí los dividiremos en 4 categorías: anódico, catódico, de adsorción y en fase vapor.

Los inhibidores anódicos retardan la reacción anódica, usualmente en dos formas: 1) agentes oxidantes que promueven la pasividad, 2) formadores de película que precipitan en forma de películas insolubles en el área del ánodo.

Los inhibidores catódicos retardan el proceso catódico, y básicamente son de tres tipos: 1) Secuestrantes de oxígeno, 2) Venenos de evolución de hidrógeno, es decir, retardan la reacción de desprendimiento del hidrógeno, y 3) Películas insolubles que reducen el área efectiva del cátodo.

Los inhibidores de adsorción controlan la corrosión por influencia en las reacciones del ánodo o del cátodo o ambos. Son usualmente compuestos orgánicos y su mecanismo para inhibir aún no es bien comprendido.

Los inhibidores en fase vapor, presentan una alta presión de vapor, pueden ser introducidos en la atmósfera y estos se adsorben en las superficies metálicas. Sus características son similares a los inhibidores de adsorción.

b) Procedimientos de arranque y paro.- Muchos problemas de corrosión no se originan durante la operación de la planta, frecuentemente estos se presentan en condiciones irregulares, como son el paro y arranque.

Los problemas de arranque generalmente tienen que ver con la operación a alta temperatura, variación de la concentración del corroyente, una inadecuada distribución de los inhibidores y algunas veces una incompleta remoción de oxígeno.

Los problemas de paro, generalmente se relacionan con procedimientos inadecuados de limpieza, para remover residuos de proceso.

DISEÑO DE INGENIERIA PARA MINIMIZAR LA CORROSION.

La corrosión en hendiduras, la galvánica y la tensión-corrosión son tipos de corrosión fáciles de controlar, por el propio diseño de los equipos de proceso.

* Corrosión en hendiduras.- Este tipo de corrosión puede ser particularmente dañina, cuando se alterna con humidificación y secado, porque los líquidos corrosivos pueden ser retenidos en las hendiduras y concentrados por evaporación.

En algunas ocasiones los problemas pueden estar relacionados con el diseño. Si un contenedor es completamente drenado el diseño del drenaje puede ser muy importante, ya que pequeñas cantidades de residuo estancado pueden ser muy dañinas. La concentración de impurezas por evaporación y su recolección por sedimentación en los recipientes, hacen las condiciones ideales para la corrosión por picado y en hendiduras, ver fig.13.

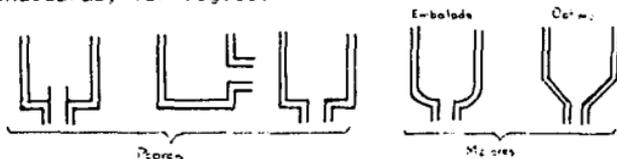


FIG.13 CORROSION EN HENDIDURAS.

* Corrosión galvánica.- La relación entre las áreas del metal activo y el metal noble es muy importante. La diferencia de potencial entre metales diferentes causa un flujo de corriente. La velocidad de corrosión, sin embargo, depende de la densidad de corriente. Naturalmente, es mayor si el área del metal activo es pequeña comparada con la del metal noble.

Si la corrosión galvánica es el problema, pueden tomarse las siguientes medidas:

- (1) Use metales cercanos entre sí en la serie galvánica.
- (2) Evite el efecto de área desfavorable.
- (3) Aisle, es decir, rompa el circuito entre los dos metales (fig.14).
- (4) Mantenga capas. Cuando el metal noble es el cátodo, es necesario mantenerlo cubierto con una capa, en la mayor área posible. Con respecto al ánodo, es esencial mantenerlo con una capa para evitar el efecto de área desfavorable, en las áreas de la misma.
- (5) Fonga un tercer metal en contacto con los dos metales en cuestión; este tercer metal cambia la actividad de los otros dos, corroyéndose él y no la estructura.

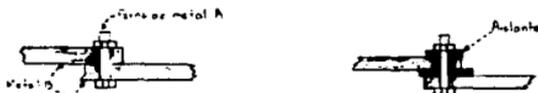


FIG.14. AISLACION EN CORROSION GALVANICA.

* Corrosión-erosión.- Se relaciona con el medio ambiente y el diseño. Es usual que se incremente cuando se incrementa la velocidad del corroyente. La incidencia y la turbulencia del corroyente son muy dañinas, las corrientes de proceso que contienen sólidos en suspensión son las que causan más problemas, por eso estos sólidos deben ser filtrados de la corriente, siempre y cuando esto sea práctico.

En sistemas de tuberías, la corrosión por erosión puede reducirse incrementando el diámetro del tubo. La aerodinámica de las curvas es útil para minimizar los efectos de la incidencia. Los baffles también son útiles para disminuir los efectos dañinos de la incidencia. Los empotrados de tubería no deben hacerse directamente sobre las paredes del recipiente,

si esto puede evitarse, las tuberías pueden ser remediadas para reducir este problema. En el caso especial de cavitación es recomendable usar superficies lisas para reducir el número de sitios de formación de burbujas.

* Corrosión por tensión. - Generalmente una superficie limpia, lisa y libre de esfuerzos incrementa las oportunidades de evitar la rotura. Este incremento, sin embargo, no es suficiente y es por eso que debe analizarse en due casos es posible emplear materiales alternativos.

* Frácticas de soldadura. La fig.15. muestra algunos problemas de las prácticas de soldadura y sus remedios. Las soldadura puede ser muy dañina porque causa cambios metalúrgicos.

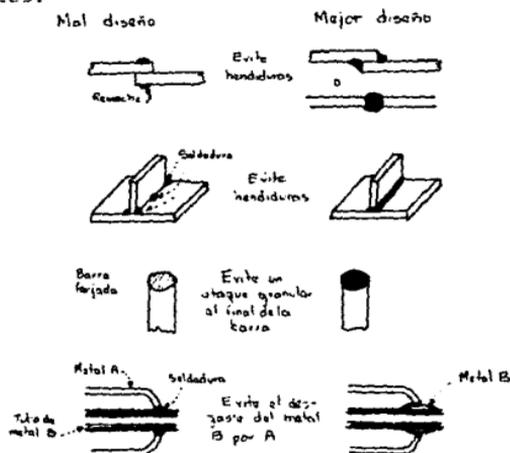


FIG. 15. PROBLEMAS DE CORROSION EN SOLDADURAS.

PROTECCION ANODICA Y CATORICA PARA CONTROLAR LA CORROSION.

Cuando hay un flujo de corriente, entre el ánodo y el cátodo en la superficie metálica de un material corroído, atacará rápidamente el área del ánodo. Si usamos un circuito externo, podemos aplicar una corriente adicional en el metal y cambiar y controlar la velocidad de corrosión.

Podemos aplicar una corriente que se oponga o nulifique la corrosión (protección catódica) o en algunos casos, podemos ajustar el potencial colocando un metal fijo, que se corroerá pero más lentamente debido a que este será pasivo (protección anódica).

Principios de la protección catódica.

En la protección catódica el metal se comporta solamente como cátodo, no hay áreas que se comporten como ánodo, y por lo tanto no es corroído. Se utiliza como protección a líneas bajo tierra y marinas, y se usa en conjunción con recubrimientos protectores.

Existen dos tipos de protección catódica: 1) Aplicación de una corriente, y 2) galvánica o sacrificio del ánodo.

1) Aplicación de una corriente.- La protección catódica es el paso de una corriente eléctrica por el metal a una velocidad igual o mayor que el flujo fuera del metal que es corroído. Esto se realiza con una larga conexión a una fuente de corriente directa a el metal corroído y un electrodo que se convertirá en el ánodo. Usualmente se coloca un rectificador de corriente como se muestra en la fig.16a, entre el nuevo electrodo y el metal protegido. El ánodo puede ser de un material inerte, o uno que se deteriore y sea reemplazado por intervalos; los materiales típicos son hierro, hierro-silicio, carbón acero inoxidable y platino.

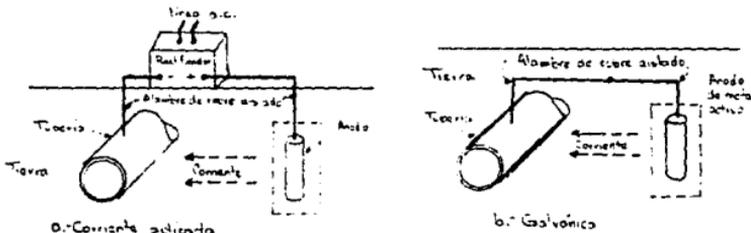


FIG. 16. PROTECCION CATODICA PARA UNA LINEA SUBTERRANEA.

2) Protección galvánica.- La protección galvánica usa metales muy activos, para proteger una estructura, de modo que suministre la corriente necesaria para detener la corrosión; esta gran actividad del metal lleva al sacrificio del ánodo.

Los dos metales deben aplicarse de tal manera que, en un ambiente dado el metal más activo sufra una acelerada corrosión, y proteger al menos activo. Este método solo se usa como control y se muestra en la fig. 16b. Los metales más comunes usados en el ánodo sacrificado son: el magnesio, zinc, aluminio y otras aleaciones.

La protección galvánica se prefiere a la técnica de aplicación de corriente, cuando el requerimiento de corriente es bajo, y el electrolito tiene una resistividad relativamente baja (10 ohm/cm), cuando no es así se prefiere la técnica de aplicación de corriente, aunque esta necesite una fuente de corriente eléctrica y largas estructuras, sin embargo, es un control automático, y esto reduce el mantenimiento y los costos de operación.

Problemas de la protección catódica:

- Posibles efectos dañinos en estructuras adyacentes.
- Las reacciones que ocurren en la superficie de la estructura protegida puede provocar daños en la misma.

Costos de la protección catódica:

Los costos de protección catódica pueden ser muy bajos si se aplica un buen recubrimiento y si el sistema es bien diseñado y aislado. Si no se aplica protección para la corrosión, los costos de reemplazamiento de material pueden incrementarse y aumentar los costos de operación.

Principios de la protección anódica.

Esta técnica es aplicada solamente a metales y aleaciones que presentan un comportamiento pasivo-activo; puede aplicarse a hierro, acero inoxidable, titanio, aluminio y cromo. Las curvas típicas de polarización para un metal que presenta pasividad, son : a' en el estado pasivo y b' en el estado activo, como se muestra en la fig. 17.

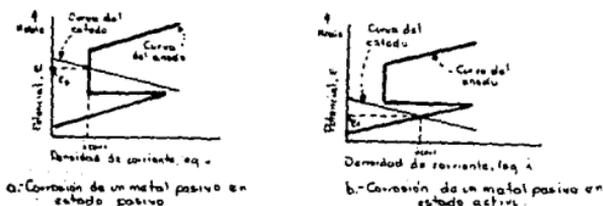


FIG. 17. PASIVIDAD EN LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN.

La protección anódica se basa en la inducción del estado pasivo con la ayuda de un circuito externo, es decir, un potencial de corrosión es ajustado del estado activo al pasivo. Una de sus principales aplicaciones es la protección de tanques de geometría simple.

La mayor desventaja de la protección anódica es la corriente tan alta que se necesita para inducir la pasividad. Las principales ventajas son:

- (1) Bajos costos de operación.
- (2) Es aplicable a una gran cantidad de corroyentes.
- (3) Es posible predecirle en el laboratorio.
- (4) La corriente de protección es una buena guía para controlar la velocidad de corrosión y descubrir protecciones inadecuadas.

Algunas posibles limitaciones son:

- (1) Sólo es aplicable a sistemas metal corroyente.
- (2) Altos costos de instalación.
- (3) La velocidad de corrosión puede ser muy alta si el sistema queda fuera de control.

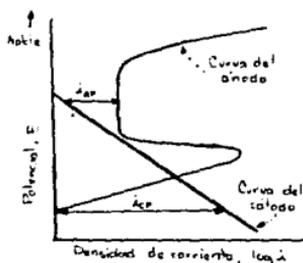
¿Que usar protección catódica o anódica?

Las principales diferencias que favorecen la protección catódica son:

- (1) Aplicable a todos los metales.
- (2) Aplicable cuando no hay fuente de poder usando electrodos de sacrificio.
- (3) Son posibles los bajos costos de instalación.
- (4) Es un metodo bien establecido.

y las que favorecen a la protección anódica son :

- (1) Pueden ser manejados corroyentes muy agresivos.
- (2) Costos de operación bajos. Ver fig.18 para una comparación con una protección aplicando corriente.
- (3) Comodidad para predecir su factibilidad y su diseño.



i_{ap} = Densidad de corriente mínima para mantener la protección anódica.

i_{cp} = Densidad de corriente mínima para mantener la protección catódica.

FIG.18. COMPARACION DE LAS CORRIENTES REQUERIDAS PARA PROTECCION

PROTECCION VIA RECUBRIMIENTO.

Los materiales metálicos e inorgánicos son recubrimientos típicos para controlar la corrosión. La selección de estos materiales en cada caso dependerá, de el corroyente, de el método de aplicación, tipo de metal base, y la naturaleza de la unión entre el metal base y el recubrimiento.

El recubrimiento es el método más comúnmente usado para combatir la corrosión. Como regla general los recubrimientos no son usados como protectores frente a agentes químicos fuertes, pero frecuentemente hallan aplicación en un método natural semejante, es decir, al aire libre, bajo la tierra y el agua; los recubrimientos plásticos y metálicos son las excepciones a esto.

Los recubrimientos pueden ser clasificados por su composición en tres categorías: 1) metálicos, 2) compuestos inorgánicos, y 3) compuestos orgánicos.

Recubrimientos metálicos.

Los metales y en algunos casos sus aleaciones, pueden ser aplicadas a casi todos los otros metales y sus aleaciones usando una o varias de las siguientes técnicas:

a) El baño en caliente: involucra la inmersión del objeto a ser cubierto en el metal recubridor fundido, que por necesidad tendrá un bajo punto de fusión, y se formará una unión metalúrgica entre el recubrimiento y el metal base, y la interfase será una aleación de ambos. La capa formada será generalmente dúctil.

La técnica se use cuando el grosor de la capa no es muy importante, cuando la parte cubierta no es compleja o cuando la uniformidad de la capa no es de consideración.

b) Pulverización del metal: involucra la aplicación de un metal fundido, en forma de pequeñas gotas (spray). Pueden usarse una gran variedad de metales, y la capa tiene normalmente un espesor de 0.002 a 0.1 in. Este se deposita sólo en los poros, pero esto es compensado aplicando una capa selladora de pintura.

Existen tres tipos de procesos para pulverizar el metal: con pistola de alambre, de polvo y de plasma; como se muestra en la fig.19.

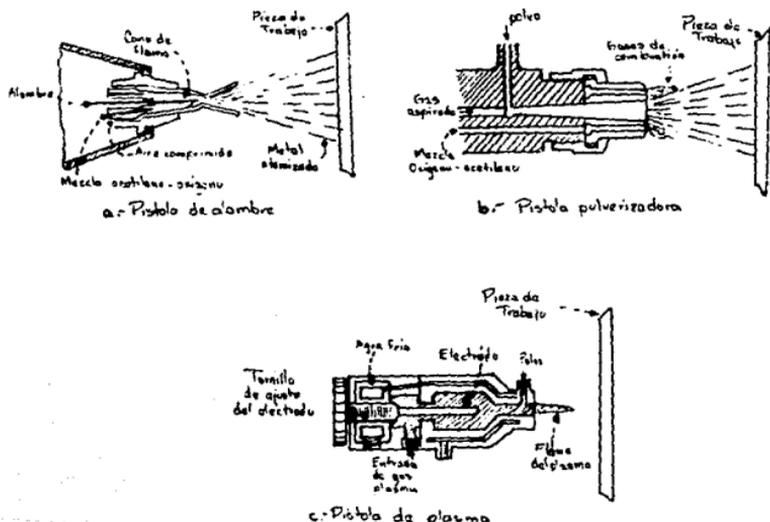


FIG.19. TIPOS DE PULVERIZADORES DEL METAL.

c) Revestimiento: es una técnica para controlar la corrosión particularmente en industrias de procesos químicos. Se aplica a recipientes a presión, reactores, calderas, cambiadores de calor y tanques de almacenamiento.

Los problemas relacionados con el revestimiento son:

- (1) Difusión de un elemento no deseado de el metal base al metal de revestimiento, durante el proceso de recubrimiento, o en operaciones de soldado, durante su fabricación o instalación.
- (2) Daños metalúrgicos en el metal del revestimiento, cuando el metal base recibe un tratamiento con calor.

d) Electrodeposición: usualmente proporciona una capa muy uniforme, como un baño en caliente, baja porosidad como en la técnica de pulverización de un metal. El principio de la electrodeposición es: $M^{n+} + ne \rightarrow M$, esta es una reacción catódica severa. La necesidad de una celda electrolítica pone restricciones en la forma y tamaño de la pieza que va a ser protegida.

El electrólito utilizado debe contener iones del metal con que será recubierto, la mayoría de los iones pueden, generalmente, pero no necesariamente, provenir del ánodo hecho del metal que será recubierto. La calidad de la electrodeposición depende de la superficie, y otros parámetros como la temperatura, el tiempo, densidad de corriente y la composición del baño.

Recubrimientos inorgánicos.

Los esmaltes porcelanizados y capas de vidrio son fundidos sobre los metales para protegerlos. Los esmaltes porcelanizados son generalmente aplicados a aceros y aluminios en un espesor aproximado de 0.004 a 0.01 in, y son usados para usos industriales y del hogar. Las capas de vidrio se usan en servicios químicos, con un espesor de 0.04 a 0.08 in y principalmente a fierro y aleaciones con níquel como base; pueden resistir una gran variedad de compuestos químicos, incluso algunos ácidos, pero son susceptibles al calor y alkalis concentrados.

Por sus propiedades mecánicas las capas de vidrio son usadas extensamente en reactores y tanques de almacenamiento, tuberías, etc. Una de las principales limitaciones, es que son quebradizos y sufren roturas cuando hay choques térmicos.

Conversión a revestimientos: Algunos revestimientos contra la corrosión, son producto de una conversión de los átomos de la superficie del metal en fosfatos metálicos, cromatos, óxidos, etc. en parte o en la totalidad de la superficie. Estos revestimientos:

- * Promueven la adherencia de un subsecuente revestimiento.
- * Provee al metal, de una resistencia a la corrosión.
- * Absorbe aceites y ceras, dando resistencia a la corrosión.
- * Mejora la apariencia
- * Actúan como lubricantes y/o absorben lubricantes.
- * Mejora la resistencia a la abrasión.

Las capas de fosfatos, cromatos y óxidos son las más comunes.

PINTURAS PARA PREVENIR LA CORROSIÓN.

Las pinturas son una de las formas más comunes de prevenir la corrosión. La selección de la pintura dependerá de su tipo, método de aplicación y preparación de la superficie.

Las partes que constituyen a una pintura son: 1) Un pigmento, 2) base o vehículo, 3) Secante, y 4) Solvente.

Las pinturas de tipo orgánico las podemos clasificar en:

* Pinturas de aceite.- Son resistentes a los álcalis y solventes, pero tienen poca resistencia a los ácidos.

* Pinturas alquídicas.- Son resinas que tienen una resistencia superior a la corrosión, pero no son recomendables para otros servicios químicos.

* Pinturas a base de agua o emulsiones.- Presentan la ventaja de su fácil aplicación y limpieza, y son casi inodoras.

* Pinturas de uretano.- Tienen buena dureza y resistencia a la abrasión, así como una buena resistencia a la corrosión.

* Pinturas de hules clorados.- Secan rápidamente, y son muy resistentes al agua y a algunos compuestos inorgánicos.

* Pinturas vinílicas.- Son más resistentes a la corrosión y resisten algunas variedades de ácidos y álcalis a temperatura ambiente.

* Pinturas epóxicas.- Resisten al agua y a ácidos inorgánicos.

* Pinturas de silicón.- Se usan para servicios a altas temperaturas, repelen el agua pero no resisten los químicos.

* Breas.- Son mezclas de coque, y se usan para impermeabilizar estructuras bajo tierra.

* Pinturas de zinc.- Difieren de las anteriores en que este tipo emplea protección galvánica por medio del zinc, lo cual previene picaduras, y perforaciones en las capas. Se emplean principalmente en equipos de acero en procesos de la industria química.

* Pinturas de acero inoxidable.- Consisten de polvo de acero inoxidable en una base orgánica. Tienen una alta resistencia a la corrosión para muchas resinas orgánicas; cuando se les agrega epóxidos se incrementa su resistencia al calor.

Aplicación de la pintura.-Es importante una buena preparación de la superficie y la primer capa debe hacerse el mismo día. La pintura debe ser cuidadosamente mezclada de acuerdo a las instrucciones del fabricante, y su aplicación puede hacerse por cualquiera de los siguientes métodos: 1) esparcido, 2) con brocha, 3) inmersión, 4) con rodillos, y 5) a chorro.

Recubrimientos en polvo.

Las resinas epóxicas, vinílicas, etc. pueden ser aplicadas directamente en la superficie metálica dando como resultado una protección a la corrosión similar a una pintura, aunque presentan diferencias.

La aplicación de estos recubrimientos puede efectuarse por dos métodos: por esparcido electrostático y lecho fluidizado, como se muestra en las fig.20a y 20b.

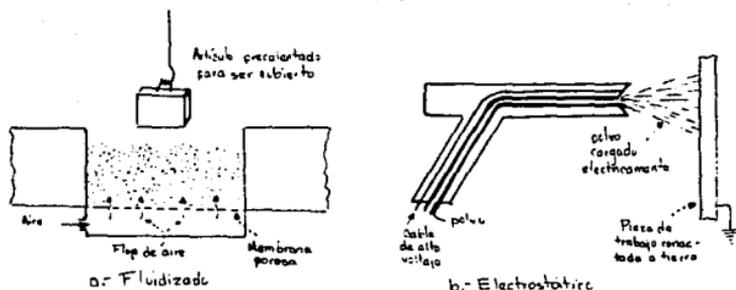


FIG. 20. METODOS PARA AFLICAR RECUBRIMIENTOS EN POLVO.

Preparación de la superficie.

La técnica de limpieza depende de: 1) Condición de la superficie, 2) Tipo de recubrimiento, y 3) Tamaño y localización de la pieza que se va a limpiar.

Limpieza química y mecánica.

La limpieza mecánica incluye un cepillado, pulido y soplado; esta última puede hacerse con una corriente a alta presión de aire o agua con partículas abrasivas, que generalmente contiene un inhibidor para minimizar la corrosión entre la limpieza y el pintado.

La limpieza química incluye técnicas que usan solventes orgánicos, y vapor desengrasante, para remover grasa, aceite y depósitos de la superficie. La limpieza alcalina se usa para algunos propósitos como remover depósitos de ácidos, sales tratadas a calor, y residuos solubles en agua. Los ácidos son empleados para remover herrumbre y agentes que contengan humedad, inhibidores y detergentes. Las grasas y aceites pueden ser removidas con un desoxidante y con otros tratamientos ácidos.

Después del tratamiento químico, es necesario hacer un lavado adecuado, en agua, los residuos ácidos o alcalinos pueden ser muy perjudiciales, si no son removidos.

Hay otros métodos de limpieza como limpieza con vapor, limpieza con flama o limpieza ultrasónica.

La inspección.

Algunos equipos o estructuras deben ser inspeccionadas regularmente para minimizar la posibilidad de una falla inesperada, con las consecuencias económicas y de seguridad que esto puede tener. La inspección de las pinturas es particularmente importante porque:

(1) El metal base puede tener una baja resistencia a la corrosión, y rápidamente fallar cuando la pintura a su vez falle.

(2) Cuando hay un problema debido a una falla de la pintura generalmente se encuentra pintura en el área del problema, y el repintar el área causa un tiempo de producción perdido.

Guía para la selección de una pintura.

La selección de una pintura involucra la respuesta de las siguientes cuestiones:

- 1) ¿El sistema de pintado resiste el ataque corrosivo, en el período mínimo de tiempo en la práctica?
- 2) ¿La pintura puede tener una resistencia a la corrosión satisfactoria, pero es la técnica de aplicado la apropiada para sus requerimientos?
- 3) ¿Es compatible el pintado con el servicio que va a prestar la parte en cuestión, (su resistencia a la corrosión es buena, pero su resistencia a la abrasión)?
- 4) Técnicamente ¿es el pintado más económico? aún considerando materiales, preparación de la superficie, aplicación, inspección y otros costos varios.
- 5) ¿Comparo económicamente otros métodos para protección de la corrosión con el pintado?

SELECCION DE MATERIALES PARA EL CONTROL DE LA CORROSION.

La resistencia a la corrosión es una propiedad que no es considerada en la selección del material para adquisición, sin embargo en industrias de procesos químicos es de gran importancia.

En la especificación del material, se requiere de tres puntos: 1) Lista de requerimientos, 2) Selección y evaluación de materiales candidatos, y 3) Elección del material más económico.

Los requerimientos típicos y algunos procedimientos involucrados en la compra y selección de materiales se dan en la tabla I.

TABLA I. LISTA PARA LA SELECCION DE MATERIALES

REQUERIMIENTOS

- Propiedades (de corrosión, mecánicas, físicas, apariencia)
- Fabricación.
- Compatibilidad con equipo ya existente.
- Mantenimiento
- Especificación de su protección.
- Disponibilidad de datos de diseño.

CONSIDERACIONES DE SELECCION

- Tiempo total de vida esperado de la planta o proceso.
- Servicio estimado del material.
- Seguridad (consecuencias de seguridad y económicas en caso de falla).
- Disponibilidad y tiempo de entrega.
- Necesidad de futuras pruebas.
- Costos de material.
- Costos de fabricación.
- Costos de mantenimiento e inspección.
- Análisis de inversión y retorno.
- Comparación con otros métodos de control de corrosión.

Para seleccionar un material, debemos conocer sus propiedades especialmente su comportamiento frente a la corrosión, para ello debemos tener la información, que se lista en la tabla II.

TABLA II. INFORMACION NECESARIA PARA ESTIMAR EL COMPORTAMIENTO FRENTE A LA CORROSION.

VARIABLES DEL CORROYENTE

- Constituyentes puros (identidad y cantidad).
- Impurezas (identidad y cantidad).
- Temperatura
- pH
- Grado de aereación.
- Velocidad de agitación
- Fricción.
- Rango estimado de cada variable.

TIPO DE APLICACION

- ¿Cuál es la función de la parte o el equipo?
- ¿Que efecto tendrá la corrosión uniforme en la habilitación del servicio? ¿Es el cambio de tamaño, la apariencia o el producto de corrosión un problema?
- ¿Que efectos tendrá la corrosión localizada sobre su utilidad?
- ¿Estará presente un esfuerzo? ¿Es la corrosión por tensión y ruptura una posibilidad?
- ¿Es el diseño compatible con las características de corrosión del material?
- ¿Cuál es el tiempo de vida deseado de servicio?

EXPERIENCIA

- ¿Que materiales han sido usados en situaciones idénticas? ¿Con que resultados específicos? Si el equipo está en operación ¿está siendo inspeccionado?
- ¿Que materiales han sido usados en situaciones similares? ¿Cuál fue su desempeño? ¿Que diferencias específicas hay entre la situación anterior y esta?
- ¿Existen experiencias en planta piloto?
- ¿Existen datos de planta, de pruebas de corrosión?
- ¿Ha habido pruebas de corrosión en el laboratorio?
- ¿Que literatura está disponible?

RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE MATERIALES

Para seleccionar un material, deben tomarse en cuenta muchas propiedades, incluyendo sus propiedades físicas, sin embargo aquí hacemos hincapié en su resistencia a la corrosión.

En la selección de materiales de construcción para un sistema dado de fluido, es importante tomar en consideración primero las características del sistema, prestando atención especial a los factores extraños que puedan influir en la corrosión. Esos factores serán peculiares para cada sistema en particular, y es importante tratar de ofrecer un conjunto de reglas empíricas que den una guía para cada situación.

Los materiales con que se construirá el sistema son la segunda consideración importante, por consiguiente, es esencial tener conocimientos sobre las características y el comportamiento general de los materiales cuando se exponen a ciertos ambientes. A continuación se presenta un breve resumen del comportamiento, que presentan diferentes materiales, frente a la corrosión por diferentes compuestos.

ALEACIONES Y METALES FERROSOS.

* Acero.- El acero al carbono es el metal más adecuado, común y barato que se emplea en la industria. Es el más soldable de todos los metales comerciales. Hay muchas normas y especificaciones para el acero al carbono en diversas formas, como barras, placas y tuberías. El A.S.T.M., A.I.S.I., A.S.N.E., A.N.S.I., y A.F.I. publican estas normas y si se desean más detalles y análisis químicos es preciso consultar tales normas. Su resistencia a la corrosión dependerá de la formación de una película superficial de óxido, aunque esta sea limitada por los ácidos diluidos, las salmueras de mar, que lo corroen lentamente y contaminan con hierro.

* Hierro forjado.- Su resistencia a la corrosión es un poco mejor que la del acero al carbono; teniendo una resistencia excelente a la corrosión atmosférica (aplicaciones estructurales) y a la corrosión del suelo (líneas de agua). El hierro forjado puede manejar sin dificultad álcalis y soluciones alcalinas, sin embargo los ácidos diluidos provocan fallas rápidamente.

* Aceros de baja aleación.- La adición de pequeñas cantidades de materiales de aleación mejora considerablemente la resistencia a la corrosión, en los ambientes atmosféricos; pero no tiene muchos efectos contra los líquidos corrosivos. Los elementos de aleación (Ni, Cr, Si, Mo) producen una película de herrumbre apretada, densa y adherente; pero en soluciones ácidas y alcalinas, la corrosión es equivalente a la del acero al carbono.

* Hierros colados.- Existen varios tipos de hierro colado:

- Hierro colado gris.- No se considera habitualmente resistente a la corrosión; aún cuando resiste la corrosión atmosférica, así como los ataques de suelos neutros y aguas naturales o neutras. Sin embargo es atacado por soluciones de ácido-sal y ácidos diluidos. Es resistente a los ácidos concentrados (nitrúico, sulfúrico y fosfórico) y también a algunas soluciones alcalinas.

- Hierro colado blanco.- Resistente a la abrasión y al desgaste, se usa para recubrimientos y para helices de bombas, dados y bolas de molinos.

- Hierro maleable.- Su resistencia a la corrosión es aproximadamente la misma que la del hierro colado gris.

- Hierro colado dúctil.- En general, la resistencia a la corrosión es similar a la del hierro colado gris; pero puede utilizarse a temperaturas altas hasta 1100 F v, a veces, todavía más elevadas.

- Hierros colados de aleación.- No se considera resistente a la corrosión, pero mejora considerablemente con diversas aleaciones:

+ Hierros colados con alto contenido de silicio.- Tienen una resistencia a la corrosión excelente. Son conocidos como Duriron y Corrosiron. Son resistentes a los ambientes oxidantes y reductores y su resistencia depende de la formación de una película pasiva. Se utilizan principalmente en los servicios de ácido sulfúrico, puesto que no se ven afectados por este a ninguna concentración, incluso a ebullición.

+ Hierros colados Ni-Resist.- Las aleaciones de níquel presentan una resistencia a la corrosión mayor a la de cualquier hierro colado, pero menor que el níquel puro. Hay pocos ataques de soluciones neutras o alcalinas; los ácidos oxidantes como el nítrico son muy perjudiciales. Se puede manejar ácido sulfúrico frío.

▲ Acero inoxidable.- Hay tres grupos de aleaciones inoxidables:

- Aleaciones Martensíticas.- Su resistencia a la corrosión es inferior a la de los aceros inoxidables austeníticos y se usan en general en ambientes ligeramente corrosivos (atmosféricos, agua dulce y materiales orgánicos).

- Aleaciones Ferríticas.- Su resistencia a la corrosión se considera buena, aún cuando no es buena en contra de los ácidos reductores, como el HCl; pero las soluciones medianamente corrosivas y medios oxidantes se manejan sin daños. Además es muy resistente a la oxidación a altas temperaturas, hasta 1500°F.

- Aleaciones Austeníticas.- Son las más resistentes a la corrosión de los tres grupos.

ALEACIONES Y METALES NO FERROSOS.

Níquel y sus aleaciones.

En general, las condiciones oxidantes favorecen la corrosión del níquel, mientras que las reductoras retrasan sus ataques. Las soluciones alcalinas neutras, el agua de mar y condiciones atmosféricas suaves no lo afectan. Se utiliza mucho para el manejo de álcalis (sosa cáustica de alta pureza). Existe un gran número de aleaciones Ni-Cu y una de las más conocidas es el metal Monel 400 y su resistencia a la corrosión es superior a la de sus componentes, más resistente que el níquel en ambiente reductores y más resistente que el cobre en los oxidantes. La aleación se utiliza para ácido sulfúrico (diluido a menos del 80%) sin aereación ya que esta aumenta la corrosión. Maneja HF hasta 92% a 235°F. Los álcalis tienen pocos efectos, pero no soporta ambientes reductores o muy oxidantes.

Aluminio y sus aleaciones.

El aluminio posee una elevada resistencia a las condiciones atmosféricas, así como a los vapores y humos industriales y a las aguas dulces, salobres o saladas. Muchos ácidos minerales atacan al aluminio, aunque se puede utilizar con ácido nítrico concentrado (por encima del 30%) y ácido sulfúrico (25%). No se puede usar con soluciones cáusticas fuertes. Las sales de ácidos fuertes y bases débiles excepto las de halógenos tienen pocos efectos. Existen innumerables aleaciones de aluminio, no obstante estas poseen por lo común una resistencia menor a la corrosión que la del metal puro.

Cobre y sus aleaciones.

Se usan principalmente en el procesamiento químico. En general, el cobre tiene una elevada resistencia a las atmósferas industriales y marinas, el agua de mar, los álcalis y los disolventes. Los ácidos oxidantes corroen con rapidez el cobre.

- * Latones.- Con menos de 20% de zinc tienen resistencia a la corrosión equivalente a la del cobre.
- * Bronces.- Tienen una mayor resistencia que los latones bajos en zinc, y se someten a deszincificación.

Plomo y sus aleaciones.

El plomo químico, el plomo ácido y el plomo con cobre son los grados que se especifican por lo común para las construcciones químicas. Cantidades pequeñas de:

- Plata y cobre contribuyen a la resistencia a la corrosión.
- Antimonio.- No mejora la resistencia a la corrosión del plomo.
- Telurio.- La resistencia a la corrosión es comparable a la del plomo químico.

El plomo tiene una resistencia a la corrosión que depende de un recubrimiento delgado de protección que se forma en su superficie. Cuando este recubrimiento es una sal insoluble (sulfato, carbonato o fosfato) su resistencia a la corrosión es alta. Si se forma una película soluble (nitrato, acetato o cloruro) proporciona poca protección y el plomo se corroe aún más.

ANEXOS

TABLA A. POTENCIALES ESTANDAR DE OXIDACION-REDUCCION

	VOLTS*
$Au = Au^{+++} + 3e$	+1.498
$O_2 + 4H^+ + 4e = 2 H_2O$	+1.229
$Ag = Ag^+ + e$	+0.799
$Fe^{+++} + e = Fe^{++}$	+0.771
$O_2 + 2 H_2O + 4e = 4 OH^-$	+0.401
$Cu = Cu^{++} + 2e$	+0.337
$2H^+ + 2e = H_2$	+0.000
$Ni = Ni^{++} + 2e$	-0.250
$Fe = Fe^{++} + 2e$	-0.440
$Cr = Cr^{+++} + 3e$	-0.744
$Zn = Zn^{++} + 2e$	-0.763
$Al = Al^{+++} + 3e$	-1.662
$Na = Na^+ + e$	-2.714

*Volts versus un electrodo normal de hidrógeno a 25°C

Ecuación (1): $\Delta G = - nFE$

donde n es el número de electrones involucrados en la reacción, F es la constante de Faraday y E es el potencial de celda. Para que una reacción sea factible (ΔG es negativo), el potencial de celda debe ser positivo.

Si una pieza sólida de hierro se introduce dentro de una solución que contenga iones hierro, la diferencia de potencial, $E[Fe/Fe^{++}]$, existirá entre el átomo de hierro en el sólido y el ion de hierro en la solución; y dependerá de la concentración de iones en la solución, si esta cantidad es de 1 gramo-átomo/l, se llamará "potencial estándar de media celda".

El potencial de celda E usado en la ecuación es definida como la diferencia de potencial entre el cátodo y el ánodo en la media celda.

Ecuación (2): $i = (E_c' - E_a')/R$

El flujo de corriente entre el ánodo y el cátodo en algún punto se mide con esta ecuación, donde R es la resistencia total del circuito. E_c' y E_a' son los potenciales del cátodo y del ánodo respectivamente. Usualmente el espacio entre el cátodo y el ánodo es muy pequeño, y por lo tanto R es pequeña, así tendremos un máximo finito en la corriente y $(E_c' - E_a')$ es pequeño y puede estimarse el punto de intersección de las curvas. Algunos metales llegan a un equilibrio, entonces tendremos un potencial de corrosión E_{corr} y una densidad de corriente de corrosión entre el ánodo y el cátodo (i_{corr}). Esta ecuación puede ser transformada por las leyes de Faraday:

Ecuación (3): $R_{mpy} = 0.13 I e d$

Donde R_{mpy} es la velocidad de corrosión/año; I es la densidad de corriente en microampere/centímetro cuadrado; e es el peso equivalente de el metal en gramos; y d la densidad del metal en gramos/centímetro cúbico.

Ecuación (4): $i_{corr} = \{ (E_a E_c) / [2.3(E_a + E_c)] \} * (\Delta I / \Delta E)$

donde E_a es la pendiente de Tafel en el ánodo y E_c es la pendiente de Tafel en el cátodo, y pueden ser medidas experimentalmente o estimadas. En casi todas las medidas de polarización lineal, se asume que $(E_a E_c) / (E_a + E_c)$ no cambia y la ecuación se transforma en:

$$i_{corr} = K (\Delta I / \Delta E)$$

Ecuación (5): $R = KW/ATD$

donde R es la velocidad de corrosión, K es una constante, T tiempo de exposición, W el peso perdido, A es el área y D es la densidad. El valor de K dependerá de las unidades usadas para R, según la tabla que se presenta a continuación:

TABLA B. VALORES DE K

UNIDADES DESEADAS	DIMENSIONES	CONSTANTE
mpy	millas/año	3.45×10^6
ipy	in/año	3.45×10^3
ipm	in/mes	2.87×10^2
mm/yr	mm/año	8.76×10^4
pm/s	pm/s	2.78×10^6
g/(m ²)(h)	g/(m ²)(h)	$1.00 \times 10^4 D'$
mdd	mg/(dm ²)(dia)	$2.40 \times 10^6 D'$

'la densidad no es necesaria para el cálculo de la velocidad de corrosión en estas unidades.

CAPITULO IV

ASPECTOS GENERALES SOBRE TUBERIAS.

CONSIDERACIONES GENERALES

Las tuberías tienen gran importancia en el diseño de una planta, ya que constituyen alrededor del 30% de los costos. Debe procurarse un arreglo simple, bueno y económico que sea soportado fácilmente y con la flexibilidad adecuada. Una ruta cuidadosa previene las expansiones térmicas y la protección de los accesorios, y los costos de fabricación y levantamiento. Agrupar tuberías donde es posible, reduce el número de estructuras soporte, aisla espacios limitados y da accesos. La comparación de los costos asegura una elección económica de válvulas, accesorios, etc. y un estudio cuidadoso de los diagramas de flujo frecuentemente revela válvulas innecesarias y tuberías sobre-especificadas.

SELECCION DE TUBERIAS.

El diseño, materiales y fabricación de sistemas de tuberías debe cumplir con los códigos aplicables a la planta en particular y al país. Estos son diferentes, y unos son muy usados como el American code for pressure piping, ANSI B 31.3, 31.4, y 31.8; así como el British equivalente, BS 3351. La tubería conectada a calderas o equipo generador de vapor debe diseñarse de acuerdo con un código, como en la sección I del código ASME, y para otras tuberías de hogares de calentadores, la sección I del código ANSI B 31.1 es aplicable.

Se debe hacer referencia a estos códigos para interpretar los criterios; variaciones permisibles en las condiciones de presión y temperatura; selección del material y datos de esfuerzos; cálculos de las paredes de la tubería; flexibilidad de la tubería; fabricación y pruebas no destructivas.

La selección de materiales considera la economía y el funcionamiento en relación a la naturaleza del fluido que se maneja y de la temperatura y presión de diseño. La atmósfera que le rodea, la tierra y ocasionalmente la cantidad de fluido, pueden ser igualmente importantes. Debe tomarse en cuenta la ruta de la tubería para la especificación del material, acomodando los movimientos térmicos y obtener un costo razonable.

El espesor nominal de las paredes de una tubería es determinado generalmente por los niveles de esfuerzo permisibles. La referencia se hace de acuerdo al código aplicable con el fin de:

- a) Seleccionar el material de la tubería.
- b) Diseñar con el espesor mínimo para la presión y temperatura de operación.
- c) Corrosión y erosión permisibles.
- d) Tolerancia de manufactura.

La corrosión permitida, también puede fijarse por condiciones especiales relacionadas con un proyecto en particular. La suma de espesores obtenidos de esta manera se compara con el espesor más cercano, comercialmente disponible, excepto cuando son necesarias algunas aleaciones especiales, se justifica una tubería no estándar. De otra manera, el uso de tamaños de tubería (en mm) DN 10, 32, 65, 90, 112, 125, 175 deber evitarse excepto cuando se requiere una conexión de equipos o para obtener velocidades críticas del fluido. Normalmente la tubería no debe ser menor a DN 15, excepto para instrumentos.

Los dobleces pulidos se usan normalmente en tuberías de acero mayores a DN 100 y un radio mínimo de 5 veces el diámetro nominal de la tubería. Para librar espacio, en tuberías mayores de DN 150 se usan codos soldados con un radio igual a 1.5 veces el diámetro nominal de la tubería. Los codos de 45° se usan, cuando las tuberías son muy largas; estos son fabricados de un tubo con 1 o más cortes de 45°. Un codo de corte simple solamente se usa para presiones bajas, tubos de ventilación o tuberías que trabajan a presión atmosférica o cercanas.

En general el uso de bridas se limita a conexiones con equipo bridado y a las válvulas. El hierro y secciones similares de tubería especial son unidas por bridas y para tamaños de DN 50 y más se requieren otras consideraciones de espacio y soporte. Las bridas también son esenciales para:

- a) Frecuente limpieza y desmantelamientos.
- b) Para ensamblar en el taller, ya que algunas tuberías requieren de un tratamiento de calor.
- c) Unir tuberías que no pueden ser soldadas.
- d) Desmantelar equipo, como compresores.
- e) Inspecciones frecuentes.

Las bridas no deben quedar sobre los pasillos, caminos y cajas de cables electricos, por riesgo a goteras. La eleccion de la brida es gobernada por los rangos de presion y temperatura permisibles, con respecto a el ANSI B 16.5, y el BS 1560, son clasificadas como de 125, 150, 300, 600, 900, 1500 y 2500 lb. Estas clasificaciones relacionan presion y temperatura de cada seleccion para una temperatura y presion especifica. El tipo metrico de bridas puede especificarse por BS 4504, pero este estandar no tiene aceptacion por parte de todos los manufactureros de bridas.

ESFUERZOS EN LAS TUBERIAS.

El arreglo de una tuberia debe prever adecuadamente la expansion y contraccion debidas a cambios de temperatura, sin causar esfuerzos excesivos en los materiales de la tuberia, o fuerzas excesivas y momentos en el equipo y sus anclas. El arreglo de la tuberia debe sujetarse a cambios de temperatura significantes, frecuentemente modificados despues de haber realizado el analisis de flexibilidad causando esfuerzos que pueden causar perdidas del contenido y riesgos inaceptables de seguridad.

Algunos tipos de equipo satisfacen los requerimientos del proceso con limitaciones aceptables en los esfuerzos de la tuberia. Otros tipos requieren consideraciones, estos incluyen a:

- a) Maquinaria rotatoria, como las bombas, compresores centrifugos, turbinas de gas y de vapor, ventiladores y codos.
- b) Bombas y compresores reciprocantes.
- c) Calentadores, secadores y hornos, particularmente calentadores rapidos.
- d) Calentadores enfriados con aire.
- e) Cajas frias de sistemas de refrigeracion donde se emplee aluminio.
- f) Equipo de hierro de alguna clase, incluyendo valvulas.
- g) Recipientes o tuberias, con paredes delgadas de ladrillo o refractarios.
- h) Recipientes y tuberias de vidrio.
- i) Cambiadores de tubos y coraza con fuelle en la coraza.
- j) Recipientes de plastico reforzados con vidrio.
- k) Cambiadores de calor y recipientes de grafito.

- l) Recipientes con celdas de carga.
- m) Tanques de almacenamiento con más de 30m de diámetro.
- n) Tubería encaquetada con vapor.
- o) Válvulas de seguridad y relevo en las tuberías de descarga.

En particular, usualmente los siguientes equipos presentan problemas de esfuerzos:

BOMBAS:

El casco de las bombas centrifugas es más fuerte que la tubería de conexión, sin embargo la tubería de carga es bastante moderada (en términos de esfuerzo permisible de la tubería) y puede producir esfuerzos en el casco, causando un desalineado entre la bomba y el eje impulsor, produciendo una falla prematura. Una característica importante del proceso bomba-tubería es que esta es 1 ó 2 veces más grande que la boquilla de la bomba, de manera que actúa como una palanca rígida sobre la bomba.

Como las bombas son generalmente producidas en serie, tienen una relación alta de potencia/peso y esto resulta en fuerzas bajas aceptables y movimientos en las boquillas. Las bombas centrifugas pueden aceptar esfuerzos razonables en la tubería de carga pero no las bombas de desplazamiento positivo porque la altura interior es más pequeña, causando una distorsión en el casco inaceptable. El American Petroleum Institute API 610 y 611 contienen una guía la cual es usualmente aceptable para cargas en las boquillas.

TURBINAS:

En la industrias, las turbinas de vapor para un tamaño de boquilla dado, permiten considerablemente fuerzas y momentos más bajos que para las bombas. La fórmula límite aplicada a las turbinas puede basarse en el National Electrical Manufacturers Association (NEMA) estandars; esta aplica al equipo y su aceptación de uso es necesaria al arrancar un proyecto.

CALENTADORES CON FUEGO:

Las experiencias con metales a altas temperaturas en calentadores con fuego son extremadamente limitantes en los esfuerzos permisibles, fuerzas y momentos. Las restricciones se aplican a la tubería, la boquilla, traslaciones y rotaciones para preservar el diseño entre la línea refractaria y los tubos, y tambien para satisfacer el diseño de los sellos de gas.

COMPRESORES:

Los grandes compresores centrífugos pueden presentar dificultades en el problema del análisis de esfuerzos. Un buen alineamiento de la tubería a las boquillas es esencial con respecto al tamaño, ensamblado con un soporte adecuado de la tubería en las vecindades del compresor. Esto no es suficiente para diseñar con los niveles de esfuerzo permitidos por el código, ya que las cargas asociadas son significativamente más altas que las limitaciones de carga de la boquilla del compresor. En general, las instalaciones largas requieren un amplio análisis de esfuerzos.

CAMBIADORES DE CALOR:

El diseño de los cambiadores de calor de tubos y coraza está gobernado por el código ASME y diseñado por Tubular Exchanger Manufacturers Association (TEMA) estándar. Los fabricantes limitan los valores del esfuerzo en la coraza del cambiador a la boquilla, que es gobernada por las fuerzas permisibles y los momentos de la tubería.

TUBERÍA:

Los movimientos térmicos de la tubería o equipo, generalmente, se arregla y/o controla por el uso de uno o más de los siguientes métodos:

- a) Cuidado en la posición del equipo, tomando ventaja de la flexibilidad inherente de la tubería.
- b) Disminuyendo el espesor de la tubería para reducir las fuerzas térmicas y momentos.
- c) Diseñando un lazo de expansión o ramales de compensación.
- d) Expansiones después de las unidades.
- e) Una junta de expansión.
- f) Acomodando los esfuerzos por el control de la dirección de la expansión, vía soporte, guías, anclas, pilotes, etc.

Cuando se usan juntas de expansión móviles se tienen consideraciones especiales dadas por los efectos de empuje axiales. Solo se trabaja con estas, cuando se cumple satisfactoriamente, dentro de la tolerancia, con la deflexión lateral, el alineamiento axial, la rotación angular y las condiciones de presión y temperatura del sistema. Los sistemas en los cuales se instalan juntas de expansión móviles son controladas por anclas rígidas, guías, soportes u obstáculos colocados de manera que la junta opere dentro de los límites de diseño.

SOPORTES DE TUBERIA:

La función de los soportes de tubería es prevenir lo siguiente:

- a) Esfuerzos que excedan los permisibles en la tubería.
- b) Evitar distorsiones en la tubería que provoquen goteras o escapes en las juntas.
- c) Empujes excesivos y momentos en el equipo conectado.
- d) Resonancia, cuando la tubería está sujeta a vibraciones.
- e) Distorsión de la tubería o flexiones que impidan su operación.

Las tuberías de tamaño DN 50 y menores son usualmente soportadas a algún lugar durante el levantamiento, a menos que sea un diseño especial. Los de tamaño DN 80 y mayores conforme a los requerimientos aplicables de acuerdo al código. Si son de DN 65 se emplea un esquema, dependiendo de la complejidad de la tubería.

Los soportes de tubería normalmente consisten de patines, abrazaderas, pernos "U" y ganchos. Los soportes de tuberías especiales requieren de algunos de estos elementos modificados o componentes adicionales para los requerimientos del ancla y guía.

Los soportes de muelle o resorte se usan para permitir el movimiento de la tubería, usualmente expansión térmica. Estos son diseñados de manera que la carga sea sostenida cada que varía con la deflexión del muelle o con una deflexión remanente constante.

Las placas de deslizamiento de teflón se usan para minimizar la fricción (fig.1), excepto para tuberías de vapor que normalmente no deben ser soportadas con otras tuberías.

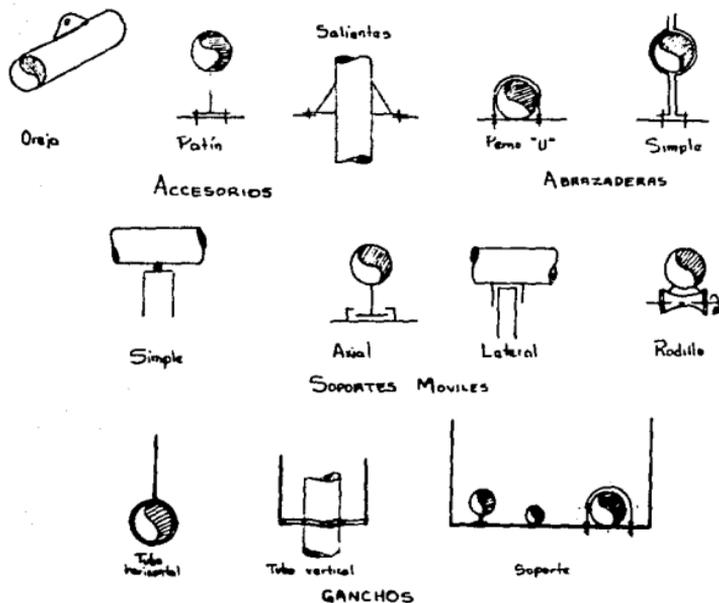


FIG.1.METODOS TÍPICOS DE SOPORTE DE TUBERIAS.

ANÁLISIS DE FLEXIBILIDAD DE LA TUBERÍA.

La flexibilidad de un sistema de tubería puede definirse como la habilidad para absorber, en forma segura, las fuerzas impuestas por todas las fuentes de carga. Un sistema flexible es aquel que opera a niveles de esfuerzo menores que el esfuerzo mínimo de trabajo para el material de la tubería, sobre el rango de temperatura de diseño y el tiempo de vida del sistema.

Las fuerzas son el resultado de un esfuerzo en el material de la tubería, los cuales surgen, en general, de:

- a) Presión en la dirección del fluido o externa a la tubería.
- b) Cambios en la temperatura de la tubería (por la temperatura interna del fluido o por condiciones externas a la tubería), cuando las terminales no son ancladas.
- c) Movimientos de las terminales de los recipientes en dirección tal que libere la expansión de la tubería.
- d) Peso muerto de la tubería, fluido (operando o en pruebas), ferro, hielo, cubiertas, válvulas, accesorios, etc.
- e) Flujo pulsante en el fluido, o vibración desde una fuente mecánica, como una máquina recíproca del sistema.
- f) Esfuerzo térmico debido a temperaturas desiguales a lo largo de la línea o en circunferencias parciales.

Una tubería puede ser cargada continuamente o transitoriamente, desde un número menor de fuentes comunes, como:

- a) Cambio de estado del fluido.
- b) Método de soporte.
- c) Cargas por vientos.
- d) Deflexión de la estructura.
- e) Falla del soporte.

La evaluación de la flexibilidad de una línea toma en cuenta todas las fuentes de carga en el sistema tan exacto como sea demandado o definido por los criterios de diseño para el sistema en particular. En la práctica, la cantidad de trabajo requerido para checar analíticamente todas las cargas es excesivo y sin embargo es necesario concentrar las formas principales de carga, mientras se tiene en cuenta que, al examinar los cálculos resultantes, son solo una indicación de las condiciones que se deben llevar a la práctica.

El objetivo del cálculo de flexibilidad es producir los conocimientos suficientes para que el diseñador obtenga un sistema que sea:

- a) Seguro, para el tiempo de vida del sistema diseñado.
- b) Práctico, que permita su manufactura y fabricación, instalación, inspección y pruebas, operación y mantenimiento; y
- c) Económico, con respecto al material usado y mano de obra hasta algún punto de operación y mantenimiento.

El análisis de flexibilidad de una tubería debe cumplir con los códigos y regulaciones para el proyecto en particular. El American ANSI B 31.3 es usado como una guía para el análisis de esfuerzos en los sistemas de tuberías y contiene tablas de esfuerzos permisibles en las paredes de la tubería para un amplio rango de materiales de tuberías. En la práctica, no obstante, el trabajo de cálculo se basa más en establecer las cargas terminales en la tubería en los equipos sensibles a las fuerzas (usualmente las máquinas rotatorias, como bombas, turbinas y compresores) que a establecer niveles de esfuerzo en el material de la tubería.

El análisis de flexibilidad se aplica usualmente seleccionando uno o más de los siguientes métodos:

ANÁLISIS VISUAL.

Este involucra:

- a) Estimación de los movimientos térmicos principales en el sistema de tubería.
- b) Evaluar los efectos de esfuerzo de momentos de flexión, asegurando que el error de suposición es seguro.
- c) Comparar los niveles de esfuerzo estimado, con los esfuerzos permisibles del código.

Si el esfuerzo estimado es más grande, se hace un cálculo más exacto.

CÁLCULO APROXIMADO.

Estos métodos incluyen el uso de nomogramas, que toman en cuenta la configuración geométrica y permiten una sobre-estimación de los niveles de esfuerzo en un espacio corto de tiempo.

El trazo de un sistema de tuberías puede llegar a optimizarse para darle flexibilidad suficiente a dicho sistema. Para efectuar tal optimización, se requiere llevar a cabo, un procedimiento iterativo, es decir, suponer un trazo preliminar, efectuar el análisis, comparar los resultados obtenidos con las condiciones, y en caso de no cumplirse, repetir el proceso hasta lograr dicho objetivo. Es importante señalar que el empleo de juntas de expansión resulta muy útil para lograr los propósitos anteriormente señalados; sobre todo cuando las condiciones del proceso y espacio son demasiado críticas, que no sea posible proporcionar flexibilidad modificando el trazo del sistema de tubería.

Por otro lado es importante indicar que en un sistema de tuberías, el diámetro está determinado por las condiciones de flujo, el espesor de la pared, por la temperatura, presión, corrosión y material; y el material a su vez se selecciona de acuerdo a las condiciones de temperatura y características del fluido que circula. Lo anterior implica que para mejorar la flexibilidad de un sistema de tuberías, no es posible disminuir el diámetro; siendo ello debido a una peculiaridad de dichos sistemas de tuberías.

Para efectuar el análisis es necesario que además del isométrico de la tubería, se cuente cuando menos con la siguiente información:

Respecto a la tubería:

- a) Identificación de la línea de acuerdo a la lista de tuberías de la planta.
- b) Temperatura y presión máxima de operación.
- c) Diámetro nominal y espesor de la pared o cédula.
- d) Clase de material: número y grado ASTM.
- e) Espesor y tipo de aislamiento.
- f) Contenido de la línea durante la operación.
- g) Deberán mostrarse todos los componentes de las líneas como: válvulas, bridas, reducciones, tees, etc. con dimensiones aproximadas. No es necesario incluir ramales cuyo diámetro sea menor a la mitad del de la línea principal.
- h) Localización de la soportería o alguna estructura que pueda usarse para apoyar la tubería.
- i) Datos sobre operación de emergencia, operación cíclica, secado con vapor, conducción de gases letales, condiciones especiales.

Respecto al equipo interconectado:

- a) Desplazamientos diferenciales de la cimentación.
- b) En el caso de cambiadores de calor o recipientes horizontales, deberá especificarse la localización del apoyo fijo, respecto a la tubería conectada.
- c) Temperatura y presión de operación del casco.
- d) Diámetro y distancia del \bar{C} del equipo a las boquillas.
- e) Material y espesor del casco.
- f) En el caso de recipientes verticales o reactores, la altura y tipo de faldón, perfil de temperaturas tanto transversal como longitudinalmente.
- g) Planos del fabricante con información dimensional, así como movimientos y fuerzas permisibles.

Aún cuando se realicen simplificaciones e idealizaciones en el análisis de flexibilidad de un sistema, este representa una cantidad considerable de trabajo y no será conveniente analizar todas las tuberías; por lo que será necesario hacer una clasificación de las líneas que conviene analizarse. La práctica usual que en general se sigue es la siguiente:

- 1.- Analizar todas las líneas de 4" y mayores que conecten a equipo rotatorio, tal como bombas, compresores y turbinas.
- 2.- Todas las líneas de 4" y mayores con temperaturas mayores a los 500 °F.
- 3.- Líneas de servicios tóxicos o letales, que alguna fuga ponga en peligro la vida del personal así como de la planta.
- 4.- Todas aquellas líneas de las que se requiera las fuerzas y momentos para información de fabricantes de equipos.
- 5.- En general, aquellas líneas que no pasen el análisis aproximado efectuado por el supervisor de tuberías.

REGLAS PRACTICAS PARA LA SOLUCION RAPIDA DE TUBERIAS

Las reglas que a continuación se mencionan forman parte de los estándares de ingeniería que utiliza una Cia. Norteamericana para verificar la flexibilidad de los trazos simples de sistemas de tuberías.

El objetivo es proporcionar un método rápido y aceptable que pueda ser usado por los diseñadores de tubería, como una primera etapa en el análisis de flexibilidad de sistemas de tubería, ya que indican las longitudes mínimas de tramos de tubería para proporcionar un trazo con suficiente flexibilidad.

Las fórmulas que se presentan no deben considerarse suficientes para cálculos formales. Se recomienda que se utilicen en general, para definir en forma gruesa la configuración de una tubería. Estas reglas no sirven para calcular fuerzas o esfuerzos ni reacciones, pero se basan en propiedades de tuberías estándar y pueden aplicarse en tuberías de acero al carbón, acero inoxidable y otras aleaciones.

Será necesario aplicar factores de corrección (*) cuando el espesor del tubo difiere del de los estándares, así como cuando (**) existan movimientos de las anclas o apoyos, adicionales a la expansión o contracción de la pierna "L".

Corrección (*), se usa una relación de momentos de inercia:

$$h_{\min}(\text{corregido}) = \frac{I_{\text{tubo especificado}}}{I_{\text{tubo estándar}}} * h_{\min}(\text{de fórmula})$$

Corrección (**), se usa una relación de expansiones lineales:

$$h_{\min}(\text{corregido}) = \frac{\Delta A + \Delta L}{\Delta L} * h_{\min}(\text{de fórmula})$$

ΔA = Movimiento del ancla.

ΔL = Expansión de la pierna "L".

La mínima longitud "h" que se requiere para dar flexibilidad al trazo de una tubería, deberá verificarse aplicando un factor de corrección "A" para temperaturas de operación. La fórmula es:

$$h_{\min} = A * D \quad (L \geq h)$$

donde: D = Diámetro exterior del tubo (in), redondeando al inmediato superior con aproximación de 0.5"; A = Coeficiente de corrección a temperaturas de operación en °F.

Temp. °F	A
150	0.40
200	0.60
300	1.00
400	1.40
500	1.80
600	2.20
700	2.50
800	2.80
900	2.95
1000	3.15

Nomenclatura:

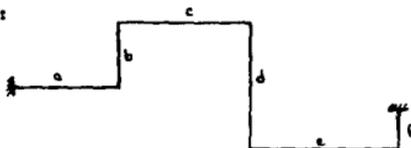
- h = Longitud de la pierna más corta, ft.
- L = Longitud de la pierna mayor, perpendicular a la pierna más corta, ft.
- D = Diámetro exterior del tubo, in, redondeando al inmediato superior, con aproximación de 0.5".
- T = Incremento de temperatura, °F, de instalación a operación.
- A = Coeficiente para la pierna mínima a la temperatura máxima de operación en °F.

FORMULAS PARA CONFIGURACIONES "L".

$$\begin{aligned}h_{nec}^2 &= 0.0025 DLT \\h_{nec} &= A \cdot D \\L_{nec} &= 400 h^2 / DT\end{aligned}$$

Modificaciones de la fórmula para configuraciones en "L" para adaptarla a más complicadas ya sea en el plano o en el espacio:

EN EL PLANO:



Se procede de la siguiente forma:

a) Se determina la longitud mayor de la línea a ángulos rectos entre anclas. A esa longitud se le llama "L".

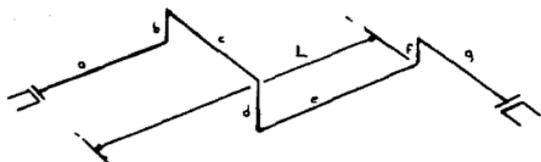
$$a + c + e > b - d + f \quad \therefore \quad L = a + c + e$$

b) Se calcula h_{nec} usando la fórmula para configuración "L".

c) Comparar h_{nec} con $\sqrt{b^2 + d^2 + f^2}$

Si $\sqrt{b^2 + d^2 + f^2} > h_{nec}$ se considera que la línea tiene suficiente flexibilidad, de lo contrario habrá que modificar el trazo.

EN EL ESPACIO:



Se procede de la siguiente forma:

a) Se determina la distancia entre anclas o ángulos rectos horizontal y verticalmente, así:

$$\text{Distancia N-S} = a + e$$

$$\text{Distancia E-W} = c + g$$

$$\text{Distancia Vertical} = b - d + f$$

b) La distancia mayor se considera como "L", entonces:

$$(a + e) > (c + g) ; (a + e) > (b - d + f) \therefore L = a + e$$

c) Calcular h usando la fórmula para la configuración "L".

Si la suma de los tramos a ángulos rectos a la dirección "L" es mayor que h_{nec} , se considera que la línea tiene la flexibilidad suficiente:

$$(b + c + d + f + g) > h_{nec}$$

FORMULAS PARA CONFIGURACIONES EN "Z".

Las fórmulas se resumen en:

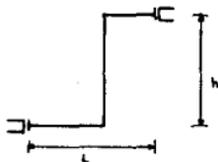
$$h_{nec} = 0.05 \sqrt{DLT}$$

$$L_{max} = 400h^2 / DT$$

$$(E/C) > 4$$

$$L = B + C$$

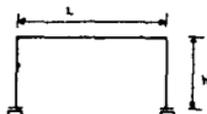
$$h_{min} = A + D$$



FORMULAS PARA CONFIGURACION EN "U".

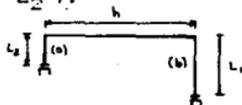
CON PIERNAS DE IGUAL LONGITUD (h):

$$\begin{aligned} h_{nec} &= 0.04 \sqrt{DLT} \\ h_{min} &= A \neq D_2 / 1.25 \\ L_{max} &= 425 h^2 / DT \end{aligned}$$



CON PIERNA DE DIFERENTE LONGITUD (L₁ , L₂):

$$\begin{aligned} h_{nec} &= 0.045 \sqrt{D (L_1 - L_2) T} \\ (L_1 - L_2)_{max} &= 500 h^2 / DT \\ h_{min} &= (A \neq D) - L_2 \end{aligned}$$



Si se conocen "h" y L₂ y se desea encontrar L₁, se procede de la siguiente forma:

Se cambia "h" por L y L₁, L₂ por las componentes de h. La fórmula resulta:

$$h_{nec} = 0.05 \sqrt{DLT} ; h_{nec} = \sqrt{a^2 + b^2}$$

El código de tuberías ANSI B 31.3-1973 (American National Standards Institute) establece en el párrafo 319.4.1. sobre requerimientos para análisis, que no es necesario un análisis formal de flexibilidad para aquellos sistemas de tuberías que satisfacen la siguiente fórmula:

$$DY / (L - U)^2 = 30 S_A / Ea$$

- donde: D = Diámetro nominal de la tubería (in).
 Y = Desplazamiento total resultante que será debido por el sistema de tubería (in).
 U = Distancia en línea recta entre anclas (ft).
 L = Longitud de tubería entre anclas (ft).
 S_A = Rango de esfuerzos permisibles (lb/in²).
 E_a = Módulo de elasticidad en frío correspondiente al material de la tubería.

ARREGLO DE TUBERIAS.

Normalmente todos los procesos y la tubería de servicios debe localizarse sobre tierra excepto la tubería de agua que puede ser subterránea para protegerla contra congelamientos, o sobre la tierra para tener un acceso general. Donde sea posible, la tubería debe arreglarse en bancos horizontales por facilidad de soporte. Los bancos que van de norte a sur deben ser a diferentes elevaciones, a las que van de este a oeste. Las excepciones deben hacerse de manera que se eviten cambios de elevación innecesarios.

Donde las tuberías pasan a través de pisos, techos o muros, los mangos de las tuberías pueden ser de suficiente tamaño para permitir el movimiento de la tubería y/o acomodar bridas y aislante. Los sistemas colectores de vapor deben guiarse de forma que el vapor ascienda continuamente al punto más alto del recipiente venteado.

Los espacios libres sobre las plataformas, pasillos y caminos debe ser mínimo de 2.1 m. Generalmente, la tubería que está alrededor de las bombas, cambiadores de calor y otros equipos, debe arreglarse de manera que haya un acceso de 750 y 900 mm; este requerimiento, puede cambiar para bombas múltiples pequeñas o equipo montado en bases comunes. Los pasillos de operación deben tener un espacio libre mínimo de 1.5 m entre cualquier proyección. Cuando las columnas estructurales se localizan en pasillos de operación el espacio mínimo será de 750 mm entre columnas y cualquier equipo (incluyendo la tubería de trabajo).

Los arreglos de tubería deben permitir la remoción de equipo para pruebas de inspección o de servicio. La tubería soportada horizontalmente en un banco vertical debe ser capaz de permitir el retiro de cada tubo independientemente.

Las tuberías que requieren limpieza frecuente (menos de 1 semana, deben tener cambios de dirección, con accesorios bridados o con dobleces de un radio mínimo de 5 diámetros. La longitud máxima de la tubería de extremo simple es de 12 m y para extremos dobles 24 m. Las líneas que no requieren limpieza frecuente, deben ser provistas de suficientes bridas para desmantelarla y el espacio suficiente para ser removida (fig.2).

Las tuberías en trincheras abiertas se usan en entre procesos o unidades de proceso, cuando estas no corren riesgos al contener vapores inflamables, o de material congelado. No deben usarse cuando hay peligro de inundación. El ancho mínimo de las trincheras por tuberías debe ser de 600 mm, un espacio mínimo de 100 mm entre los tubos y las paredes, y 50 mm del tubo al fondo de la trinchera.

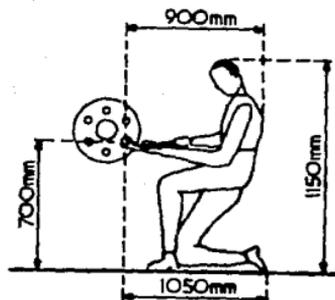


FIG.2. ACCESO A LAS BRIDAS DE LA TUBERIA.

Las tuberías normalmente son localizadas en soportes elevados unos 300 mm o más sobre el piso para permitir una limpieza fácil y pintado.

Los arreglos de la tubería no estén pre-establecidos y puedan aplicarse arbitrariamente en todas las plantas. Sin embargo algunas generalizaciones son útiles para el arreglo de tuberías. Estas aparecen a continuación, de acuerdo al equipo o fase de diseño de la tubería.

Orientación de la boquilla.

Las boquillas elevadas en recipientes son invariablemente fijas por los ingenieros de proceso, ya que su posición se determina durante el diseño del proceso. La orientación de las boquillas puede hacerse por equipo manufacturado, incluyendo cambiadores de calor, ciertas bombas, compresores, y otro equipos mecánicos. El diseñador debe tomar ventaja de las posibilidades para obtener un arreglo adecuado al conectar la tubería.

RECIPIENTES.

Recipientes verticales.

La tubería de un recipiente vertical, se localiza a lo largo del mismo, desde la salida de la plataforma o estructura elevada, simplificando la tubería y minimizando las posibles interferencias. La tubería de la porción superior del recipiente debe ser soportada al recipiente por accesorios localizados en el recipiente. Esto reduce el movimiento relativo entre el soporte y la tubería.

La tubería debe localizarse de preferencia por debajo y no sobre las plataformas. La orientación de todas las escaleras y entradas hombre debe ser en la misma línea, si es posible; esto permite tener líneas libres de estructuras de acero alrededor y a lo largo del recipiente.

Hay que dar espacio desde lo alto del recipiente hasta tierra para un mantenimiento a partes bajas y válvulas, y dar salidas de drenaje, vapor y válvulas de relevo conectadas a otros recipientes.

Recipientes Horizontales.

Localizar la entrada y salida a extremos opuestos con la entrada en la parte superior y la salida en la parte baja, si no se especifica otra cosa.

Colocar el indicador de nivel del líquido o controlador cerca del centro, lejos de turbulencias provocadas por la entrada o la salida. Las conexiones de presión deben realizarse en lo alto y las de temperatura al fondo en el centro de la salida o en el centro de la línea de salida. Las conexiones de vapor de salida deben ser tangenciales y en el centro del fondo, opuesto a aberturas o entradas hombre.

Colocar entradas hombre en lugares de fácil acceso. Los cuales pueden ser en lo alto, a los costados o en los extremos.

Cambiadores de calor.

Las tuberías deben estar fuera de las áreas de levantamiento para facilitar el retiro de las piezas bridadas; esto evita el manejo de longitudes largas de tubería durante el mantenimiento.

Usualmente en las especificaciones del cambiador se da la dirección del flujo. Si no es así, el paso del agua fría a través de los tubos entra en la conexión del canal del fondo y sale por la parte alta, así cuando suceda una falla en la presión del agua el cambiador retiene parte de la misma. En general, la corriente caliente entra por arriba del cambiador y la corriente fría por debajo. Los vapores condensados, incluyendo el vapor, entran por la parte alta y descargan en el fondo (usualmente en el lado de la coraza).

Los arreglos de cambiadores en serie o paralelo, se pueden apilar convenientemente a una altura de alrededor de 12 ft. Las válvulas e instrumentos se localizan hacia los accesos de paso.

Bombas.

La tubería no debe correr directamente sobre la bomba, esto dificulta el mantenimiento de la bomba. Hay que evitar congestión de tuberías frente a las bombas (fig.3).

Colocar cada bomba en la línea, tan cerca como sea posible y opuesta a la fuente del fluido, esto reduce tuberías. Deben anclar o soportar las líneas de succión y descarga, para prevenir esfuerzos excesivos en la bomba.

Las líneas de succión deben ser tan cortas como sea posible, con un número mínimo de codos; esto evita caídas de presión y ayuda a asegurar la operación de la bomba libre de esfuerzos. Hay que evitar repentinos decrementos en el tamaño de la línea.

Usar reductores excéntricos con la pendiente de los lados hacia abajo para evitar burbujas de gas (fig.4).

La pendiente de la línea de succión debe ser 1/4 in. de la alimentación hacia la bomba, cuando la bomba está abajo de la fuente, y en la dirección opuesta cuando la bomba está sobre la fuente. La entrada de los codos de bombas de doble succión deben instalarse en la vertical, para evitar una distribución homogénea del flujo.

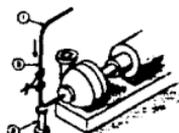
Colocar colederas en la líneas de succión, con un área de sección transversal de 3 a 4 veces el de la línea. Y evitar válvulas en la línea de succión a menos que sea necesario para bombas múltiples.

Dar aproximadamente 3 diámetros en línea recta de tubería entre la succión de la bomba y el último codo, esto evita turbulencias en la entrada.



MEJOR

A- No hay interferencia de la tubería en la parte alta



PEOR

- 1- La tubería no debe estar directamente sobre el equipo.
- 2- Soporte inútil.
- 3- Congestión frente al equipo.

FIG.3. TUBERIA DE BOMBAS.

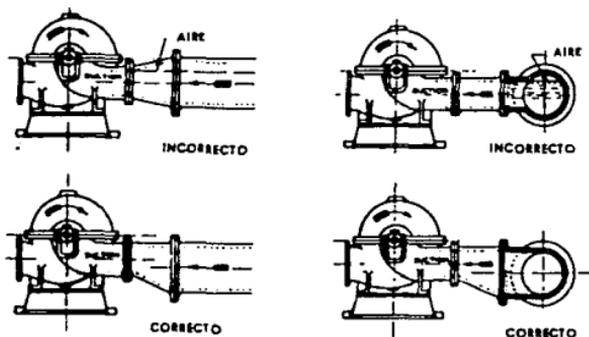


FIG. 4. USO DE LOS REDUCTORES EXCÉNTRICOS EN UNA BOMBA.

Colocar válvulas check entre la boquilla de descarga y la válvula de salida, para prevenir que el líquido regrese cuando la bomba para. Colocar válvulas de relevo entre la bomba y la válvula de salida de bombas recíprocantes.

Compresores.

Evitar cambios en la dirección de la tubería y cuando sea necesario usar codos longitud-radio. Evitar dobleses violentos o marcados en la entrada de los compresores recíprocantes.

Usar curvas de 10° en la línea de descarga de un compresor centrífugo cuando se requiera el doblaz.

No usar tuberías elevadas a máquinas recíprocantes, la vibración excesiva provoca problemas. El soporte de la tubería del compresor debe estar separado de las otras tuberías.

Instalar coladeras en las líneas de succión. Y usar válvulas check en las líneas de descarga dentro del mismo cabezal para proteger de oleadas.

Criterios generales para el arraglo de la tubería.

Altura mínima.

Sobre plataformas y en edificios.	7 ft
Sobre cruces.	9 ft
Sobre pasillos o caminos.	15 ft a 22 ft (Dependiendo del equipo de mantenimiento)
Arriba del nivel de la tubería sobre durmientes.	12 in a 18 in
Corrientes verticales adyacentes a equipo o estructuras (espacio horizontal).	12 in

Tamaño de las líneas.

- No usar 3/8, 1 1/4, 2 1/2, 3 1/2, 4 1/2, 5 y 7 in (no son comunes).
- Las conexiones de drenaje, venteo y muestreo deben ser como mínimo de 3/4 in.
- Las líneas que pasan por sobre la cabeza no deben ser menores de 1 in, excepto para conductos de instrumentos.

Espaciamiento.- Suponer que todas las líneas son bridadas y arregladas con 1 in entre bridas

Longitud de líneas.- Observar que las líneas sean tan cortas como sea posible, especialmente en líneas de mezclado o que requieren una caída de presión mínima, como las líneas de succión de las bombas o líneas al vacío.

Todas las líneas deben correr sobre tierra, excepto líneas de agua, o ciertas líneas de compresores.

Arreglar las líneas que corren en la misma dirección, de forma tal que su fondo quede en un mismo plano. Las líneas aisladas se soportan en patines para proteger el aislante, el cual cambia la elevación relativa de la tubería sobre el soporte. Las líneas de temperatura moderada pueden colocarse sobre el soporte y aisladas, como se muestra en la fig.5

Nunca cambiar de dirección sin cambiar de elevación. Establecer una elevación para líneas de este a oeste y otra para líneas de norte a sur, usualmente 18 a 30 in sobre las primeras; esto evita interferencias y confusión en las líneas (fig.6).

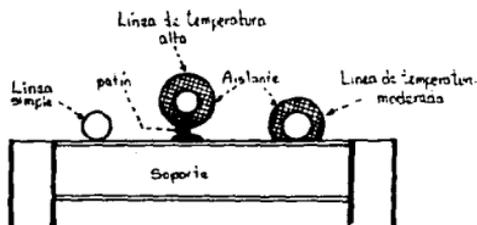


FIG.5. LINEAS DE TEMPERATURA ALTA Y MODERADA.

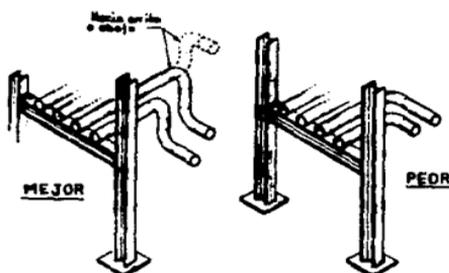


FIG.6. CAMBIO DE DIRECCION CON CAMBIO DE ELEVACION.

SOPORTES DE TUBERIAS.

Los soportes dan al sistema de tuberías de interconexión de procesos largos, principalmente soporte a través de toda el área de la planta para cumplir con su diseño. En los soportes encontramos líneas de proceso, cabezales de relevo, tubería contra el fuego, así como instrumentos y cajas de cables eléctricos. La elección entre puentes o soportes, se basa dependiendo de cual es el más económico de construir. Los puentes pueden ser empleados cuando el espacio sobre el piso es crítico y se necesitan grandes espacios libres.

El arreglo de soportes debe hacerse tan pronto como se determine el diagrama de flujo y los planos son disponibles. Usando estos documentos se prepara un diagrama o esquema de la ruta, poniendo inicialmente la tubería directa entre los equipos y solamente utilizando los soportes necesarios. Esto facilita la identificación de zonas en las cuales la densidad de tuberías es mayor, entonces se establecen los soportes, ancho del soporte y/o el número de hileras de tuberías. Después se hace una comparación entre el arreglo de tuberías y el de equipo para reducir la cantidad de soportes. Los soportes pueden ser en línea recta, o en formas "L", "T", o "U" de acuerdo a las necesidades (Fig.7).

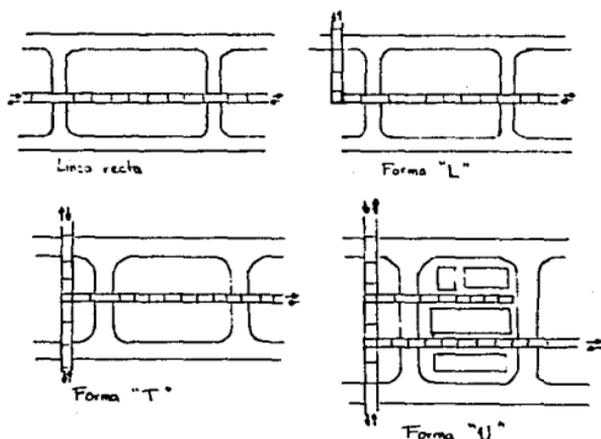


FIG.7. ARREGLOS TÍPICOS DE SOPORTES.

Los soportes deben correr en la misma dirección y de preferencia a la misma elevación. El espaciamiento de puntales debe ser regular, y deben examinarse las columnas de equipos adyacentes para combinar los cimientos. Los puntos soporte de líneas de diámetro grande deben localizarse directamente sobre, o lo más cerca posible, de los puntales de soporte (fig.8), para optimizar los momentos de pandeo en los miembros del soporte, las tuberías con líquidos con $\rho > \text{DN } 300$, es más económico que viajen al nivel de la tierra.

Las líneas de proceso deben localizarse contiguas a las líneas gruesas y las líneas de servicios ocupan la parte central con las líneas calientes en la parte exterior, para usar al máximo el ancho del soporte para lazos de expansión, y lograr un buen soporte. Las líneas calientes usualmente son montadas en patines y aisladas. Solamente las líneas que requieren un drenaje completo por razones de proceso, corrosión o seguridad tendrán una pendiente continua.

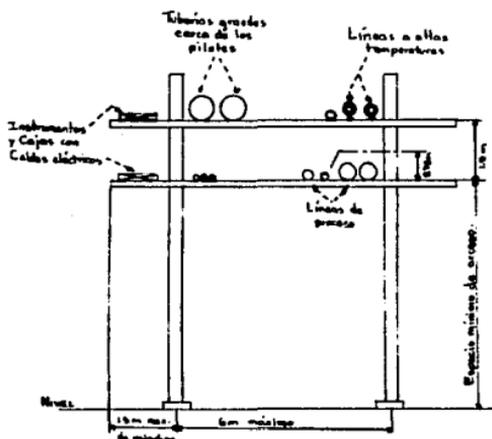


FIG. 8. SECCION TRANSVERSAL TIPICA DEL ARREGLO EN UN SOPORTE

Las cajas de cables eléctricos y de instrumentos se colocan frecuentemente en el voladizo (cantilever) del soporte, y es preferible que los cables viajen horizontalmente al banco de tubos y no verticalmente, y no deben colocarse contiguos a líneas que contengan líquidos o solventes.

Usando las cartas de espaciamiento de tuberías y tomando en cuenta el espesor del aislante, se puede calcular el ancho requerido del soporte. Los espacios horizontales típicos, los cuales son gobernados por el diámetro de la tubería o aislante son los siguientes:

- a) Separación tubo a tubo: 50 mm.
- b) Para líneas aisladas el espacio debe ser 75 mm.
- c) Cuando la tubería es bridada, el espacio será entre la superficie de las paredes de la brida no aislada (aislada o no) de la tubería más grande y la superficie de la pared de la tubería o aislante de la tubería menor.
- d) El espacio tubería a acero: 50 mm; esto debe ser desde la brida o aislante, cualquiera que sea el mayor.

Se da un espacio extra al soporte del 20 al 30% de ancho y fuerza, para futuros requerimientos.

Las tuberías no deben cambiar de posición en el soporte a menos que se requiera:

- a) Evitar obstrucciones.
- b) Economizar en el acero del soporte.
- c) Prevenir esfuerzos de flexibilidad.

Las elevaciones deben ser a un nivel constante y común al fondo del nivel de las tuberías. Para determinar la elevación de los niveles del soporte, debe considerarse los requerimientos de espacio libre:

- a) Sobre rieles y caminos.
- b) Acceso de equipo bajo el soporte, equipo móvil.
- c) Bajo líneas conectadas en el soporte o equipo adyacente.

TUBERIAS DE SERVICIOS.

Los sistemas de tuberías de servicios son especificadas en un diagrama por separado para cada servicio; estos diagramas indican donde se conectan al proceso o equipo y las interconexiones con cabezales. Los servicios consisten principalmente de vapor, aire, refrigerantes y agua contra incendios.

TUBERIAS DE VAPOR:

El arreglo de las tuberías de vapor debe examinarse para tener la flexibilidad adecuada en los movimientos térmicos. Los cabezales principales de vapor se mantienen en la orilla del tope del nivel del soporte, para permitir lazos de expansión donde sean necesarios. La distribución de vapor se prefiere hacer desde un cabezal principal a sub-cabezales que sirven a cada uno de los usuarios y provistos de una válvula de aislación en el cabezal principal. Todas las líneas

de vapor deben correr de forma que se eviten depósitos de condensado y no libre las trampas de vapor. También deben estar provistas con un drenaje adecuado o trampas de vapor, cuando no hay ninguna de estas dos, se conecta directamente al desagüe.

La descarga de condensado desde las trampas de vapor, se conecta normalmente a la parte superior del cabezal de condensado.

TUBERIAS DE AIRE:

Las conexiones de tuberías de aire de planta y de instrumentos, debe hacerse en lo alto del cabezal, excepto en el caso de un ramal de tamaño menor que el cabezal, en este caso la conexión puede hacerse a un costado del cabezal. Los cabezales de aire de planta y de instrumentos normalmente se localizan en el nivel superior del soporte. Las válvulas de aislamiento del aire de planta deben colocarse en el equipo, mientras que las de aire de instrumentos deben colocarse en el cabezal. El aire de instrumentos debe estar siempre libre de aceites y humedad.

TUBERIAS CON AGUA FRIA:

El agua fría es distribuida para varios usos en sistemas subterráneos o sobre tierra en soporte elevados. El tipo de sistema empleado es decidido al comienzo del proyecto o siguiendo los arreglos existentes. La tubería subterránea es más apropiada en los lugares cercanos a los límites del plano, y corre debajo de la línea normal de escarcha a 750 mm si es grande. Un sistema incluye líneas de flujo y de retorno cada una con válvulas aislantes en los límites del plano y, si es subterránea estas válvulas deben colocarse en cajas de concreto.

Donde existe la posibilidad deben colocarse puntos de drenaje para permitir un drenaje de la sección sellada o aplicando vapor. Por razones de seguridad, el suministro de agua a cambiadores de calor, condensadores, enfriadores, etc. debe arreglarse de manera que el equipo cumpla con su desempeño en caso de una falla de agua. Si esto no es posible debe haber una válvula check en la línea de suministro, para prevenir que el agua regrese al cabezal.

Las líneas que suministran grandes cantidades de agua deben tener un bypass entre las líneas de entrada y salida para permitir un flujo continuo en caso de que el equipo se tape durante un congelamiento del agua.

TUBERIAS DE COMBUSTIBLE:

Cuando el gas combustible se suministra a los límites del plano debe estar seco y a presión constante. Las conexiones de ramales de aceite y gas combustibles deben hacerse en lo alto del cabezal. Las válvulas aislantes deben colocarse en los límites de batería de la planta y en todos los ramales del cabezal para permitir un cierre total en caso de fuego. La tubería de gas combustible debe arreglarse de manera que se elimine cualquier bolsa o sello de condensado. La tubería de aceite combustible normalmente se instala como un sistema circulante con calderas colocadas en la línea de succión de cada bomba.

TUBERIAS CON REFRIGERANTE:

Las tuberías con refrigerante no deben colocarse en corredores, pasillos o mástiles altos y deben ser siempre accesibles. Cuando pasan en las paredes, o espacios libres, debe estar a 2.25 m sobre el piso, excepto cuando corre en el techo. La pérdida de presión en la línea del líquido refrigerante debe ser suficiente pequeña para mantener la presión del sistema a un nivel alto para prevenir la vaporización del líquido.

VALVULAS Y PUNTOS DE SANGRADO.

Venteeo, drenaje y puntos de muestreo.

Las líneas de tubería relevantes deben estar provistas con un venteeo en cada punto alto y una conexión al drenaje en cada punto bajo. El venteeo y el drenaje de un proceso debe indicarse en el diagrama de flujo, pero hay puntos adicionales que no se muestran y pueden ser necesarios para propósitos de pruebas hidráulicas. Las válvulas de drenaje y venteeo deben localizarse tan cerca como sea posible a la tubería y en un lugar despejado de cualquier aislación. El drenaje alajado que requiere la tubería debe terminarse en forma tal que al final del tubo sea visible desde el punto de drenaje.

Un punto de muestreo debe mostrarse en el diagrama de flujo. Donde las condiciones lo permiten, deben tomarse

muestras desde la sección de tubo el cual esta sujeto a las condiciones de flujo y no hay bypass, ramales muertos o depósitos. Los puntos de muestreo en líneas de gas deben tomarse sobre la línea central horizontal del tubo y para líneas con líquidos desde la pared o a 45° bajo la horizontal. La línea de muestreo debe ser tan corta como sea posible, y el orificio de salida de la muestra en la tubería de equipos con servicio caliente, debe ser provista de medios para obtener la muestra en frío. Las conexiones deben ser idealmente colocadas a una altura de 1 m sobre el piso o plataforma y no estar al nivel de los ojos o sobre ellos, para poder manejar adecuadamente la muestra.

Colocación de las válvulas.

Las válvulas que son operadas frecuentemente o requieren servicio deben ser accesibles desde el nivel, plataforma o pasillo. Esto no es una buena regla para colocar las válvulas que tienen que ser operadas regularmente, y como tal tiende a ser rechazada; esto solo se permite si no hay otra alternativa, si la válvula es pequeña, si la fuerza necesaria para abrirla es pequeña y la operación de la válvula se requiere ocasionalmente (no más de 1 vez por mes). Las válvulas que son operadas muy raramente (1 vez por año o para futuras expansiones) pueden colocarse en lugares inaccesibles al operador del proceso, siempre y cuando no sea importante en una emergencia.

La distancia máxima sobre el piso de operación o nivel de plataforma al centro de línea de la rueda del vástago de la válvula debe ser de 2.2 m; cuando esto no es posible, puede operarse con una cadena, y esta debe estar suspendida a 1 m del alcance del nivel de operación. El volante del vástago de la válvula debe colocarse de forma que no interfiera con accesos o equipo de mantenimiento, y orientarse de forma que cuando esta en posición de operación el vástago este en la posición (en orden de preferencia):

- a) Verticalmente, hacia arriba.
- b) Horizontal.
- c) Hacia arriba 45°.
- d) Hacia abajo 45°.

Una válvula con un eje horizontal es más fácil usar cuando el eje del volante es entre 750 mm (válvulas pequeñas) y 1.5 m (válvulas grandes) sobre el nivel de operación (fig.9).

Para válvulas montadas con eje vertical, la altura óptima del volante es aproximadamente 1.1 m sobre el nivel de operación. Si la válvula se usa frecuentemente, la altura de hasta 1.5m es aceptable. Las válvulas aislantes en líneas completas o en los límites de batería de la planta deben agruparse siempre, de forma que puedan operarse convenientemente desde una plataforma simple.

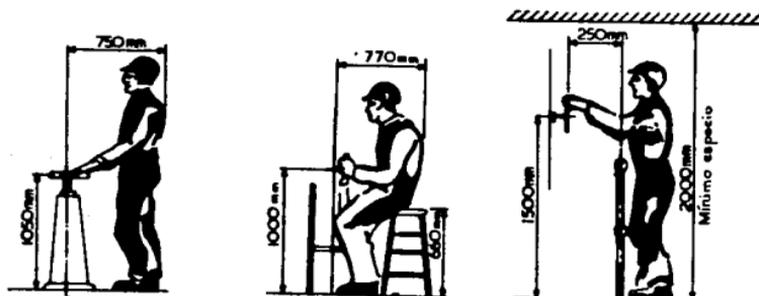


FIG.9. ALTURAS PARA LA COLOCACION DE LAS VALVULAS.

Las válvulas de control y de relevo deben colocarse de manera tal que sea fácil su operación o reemplazo.

Las válvulas de bloques de uso frecuente deben ser accesibles desde plataformas, o usar extensiones o cadenas para operar las válvulas sobre 7 ft 3 in del nivel.

Colocar válvulas:

- a) De bloqueo al cabezal en todos los ramales.
- b) De emergencia en lugares lejanos, como la parte trasera del cuarto de control, para que el operador pueda cerrarlas en caso de fuego u otra emergencia, mientras su posición es relativamente segura.
- c) De salida de los soporte de tubería para facilitar su acceso (fig.10).

No colocar válvulas en corrientes verticales, donde es la salida de un cabezal o recipiente, ya que este atrapa líquido y el recipiente o cabezal no puede ser completamente drenado durante la reparación o inspección (Fig.11).

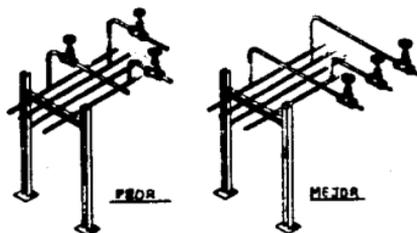


FIG.10. LOCALIZACIÓN DE VALVULAS EN LOS SOPORTES.

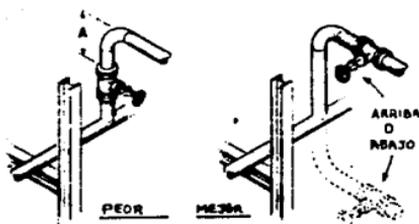


FIG.11. EVITAR COLOCAR VALVULAS EN CORRIENTES VERTICALES.

CAPITULO V

ASPECTOS DE LA INGENIERIA ELECTRICA.

Muchas plantas en la industria de procesos químicos, tienen un gran consumo de energía eléctrica, para suministrar poder y operar muchos de los equipos de proceso y para dar iluminación. En algunas plantas de procesos químicos el suministro de la energía eléctrica es una parte integral de la planta.

Por estas razones es importante e indispensable que el ingeniero químico maneje y comprenda todos los conceptos relacionados con esta rama de la ingeniería. Ya que le serán de gran utilidad en su futura vida profesional.

En este capítulo presentamos conceptos básicos de eléctrica, como son usos, distribución y control de la energía eléctrica, pretendiendo con ello proporcionar un conocimiento básico acerca de la materia a nuestro lector.

CONCEPTOS BASICOS.

A continuación presentamos breves definiciones de algunos conceptos eléctricos, con el solo propósito de hacer un recordatorio, ya que suponemos que nuestro lector a manejado y estudiado estos conceptos con más profundidad.

Voltaje.

Talvés el concepto más elemental es el de la diferencia de potencial eléctrico, el cual comúnmente llamamos voltaje, y podemos decir que es la presión eléctrica de una fuente. La unidad que usamos para medir el potencial es el volt.

Corriente.

El movimiento de cargas através de un conductor como respuesta a una diferencia de potencial eléctrico produce una corriente. Los conceptos de corriente y voltaje están íntimamente ligados. hasta el punto que es imposible hablar de uno sin mencionar el otro. La unidad estándar de corriente es el ampere.

Resistencia.

Es la propiedad de un material dado, el cual tiene una cantidad límite de corriente que podrá fluir através del material, en respuesta a una diferencia de potencial fijo. Un buen conductor eléctrico tendrá una baja resistencia. La resistencia es medida en unidades de ohm.

Resistor.

Es un componente eléctrico que tiene una resistencia específica al flujo de la corriente. Los datos más importantes que debemos conocer de un resistor son: 1) Resistencia nominal, 2) Tolerancia (algunos se desvían de su tolerancia nominal 5%, 10%, etc), 3) Coeficiente de temperatura (la resistencia varía con la temperatura), y 4) Rango de potencia (que tanto calor puede disipar el resistor).

Ley de Ohm.

Establece que el voltaje desarrollado por una resistencia es proporcional a el flujo de corriente através de esta; es usualmente escrita como: $E = IR$, donde E expresa el voltaje, V; I la corriente en amp; y R la resistencia en ohm.

Ley de Joule.

Establece que el calor producido (potencia) es proporcional al cuadrado de la corriente. La resistencia es la constante de proporcionalidad, entonces tenemos: $P = I^2 R$; donde P es la potencia, en watt; I es la corriente en amp; y R es la resistencia en ohm.

Combinando ambas leyes y tomando como disipación un watt, equivalente a un flujo de calor de 0.239 cal/s, tendremos la potencia: $P = IE = E^2 / R$.

Leyes de Kirchoff.

1) La suma algebraica de las fuentes de voltaje alrededor de un circuito debe ser igual a la caída IR, cuando el circuito es atravesado completamente en una dirección dada.
2) La suma de todas las corrientes que llevan a un punto en un circuito, deben ser igual a la suma de todas las que salen del mismo punto.

TRANSFORMADORES ELECTRICOS

Los sistemas de poder electricos para plantas en las industrias quimicas de proceso requieren de diferentes y variados tipos de voltajes, por una variedad de razones tecnicas y economicas, para la aplicacion de energia a los equipos de proceso.

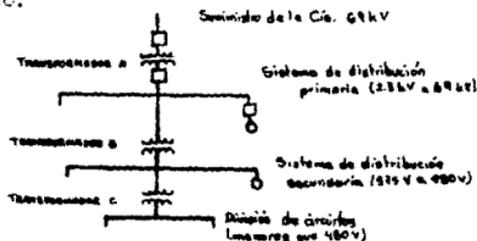


FIG. 1. VOLTAJES PARA SERVICIOS ELECTRICOS.

En la fig. 1 observamos como son requeridos varios servicios electricos a diferentes voltajes. Estos se obtienen convirtiendo altos voltajes a otros más bajos empleando transformadores. Observamos que el punto de alimentación lleva un voltaje elevado 69 KV, la razón de emplear voltajes tan elevados es simple eficiencia, ya que los voltajes grandes con corrientes pequeñas producen menos pérdidas por resistencia en los cables empleados para transmisión. El transformador inicial convierte y ajusta este voltaje a las necesidades de la planta, en una distribución primaria. Los voltajes más comunes de esta primera etapa van de 4.16 a 13.2 KV, ya que estos pueden alimentar cargas como motores de 1000 HP o más.

Básicamente un transformador, transfiere energía eléctrica desde un nivel de voltaje y corriente a otro, através del principio de inducción mutua. En su forma simple consiste de un rollo primario de n_1 vueltas de alambre, junto con un rollo secundario de n_2 vueltas en un núcleo de hierro, como se muestra esquemáticamente en la fig. 2.

El primario es conectado a una fuente de corriente sinusoidal, y el secundario a una carga de R ohms. Cuando la corriente en el devanado primario varía, se establece un cambio en el flujo magnético, el cual es interceptado por el devanado secundario. Esto causa una fluctuación del voltaje en las terminales de salida de el transformador.

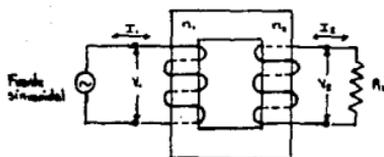


FIG.2. ESQUEMA DE UN TRANSFORMADOR.

Las relaciones entre el voltaje, V_2 , desarrollado a través de la carga y la fuente sinusoidal de voltaje en las terminales de salida es:

$$V_2 / V_1 = n_2 / n_1,$$

donde n_2 / n_1 es llamado la "relación de devanado" del transformador. Asociando la resistencia, R_{in} , con el circuito de entrada:

$$I_1 R_{in} = V_1,$$

La resistencia, R_{in} , puede decirse que es la carga que presenta la fuente cuando es conectada a el transformador primario. Muchos transformadores tienen múltiples devanados secundarios para dar diferentes niveles de voltaje de salida.

Un gran número de circuitos encontrados en las plantas pequeñas requieren el uso de voltajes aún menores que los de la distribución primaria. Otros transformadores disminuyen nuevamente el voltaje de 4.16 o 13.2 kV a 575 ó 480V. Estos voltajes pueden emplearse para motores de menos de 500 HP y rectificadores. Los voltajes menores a 480 V proveen energía para cargas eléctricas manuales tales como luces, motores pequeños y circuitos de control. En la práctica los voltajes más comunes son 240 y 120 V.

Los transformadores para suministrar los voltajes mostrados en la fig.3 tendrán diferencias en sus características y diseños. El transformador A tendrá una gran unidad llena con aceite capaz de manejar un sistema de tres fases. El transformador B será similar al A pero más pequeño. El transformador C tendrá una unidad de enfriado con aire res

decir tipo seco) o un enfriador de aceite para manejar tres fases o una fase sencilla.

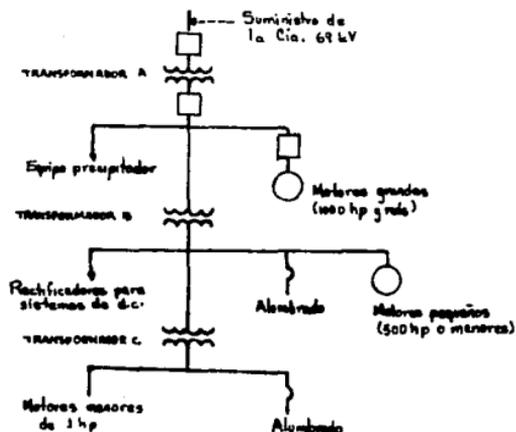


FIG.3. DIFERENTES SERVICIOS ELECTRICOS REQUERIDOS EN UNA PLANTA

Todos los transformadores tienen pérdidas, pero, como resultado de su eficiencia (superior al 98%); estas son pequeñas. Los transformadores tienen muchas diferencias en tamaños y formas, obviamente las diferencias en tamaño indican la potencia que el transformador puede manejar, por otra parte, las diferencias en forma pueden indicar el método de enfriamiento, de construcción o de funcionamiento.

Transformadores de poder.

El propósito básico de un transformador de poder es proveer de grandes cantidades de energía eléctrica. Examinemos pues una "placa de nombre" típica para un transformador de tres fases y discutamos los puntos de interés (fig.4):

Voltaje: Aparece en la esquina superior derecha de la figura:

13 500 GFD Y 7967 volts

Esta información nos dice que el voltaje primario de fase a fase en una conexión Y a tierra (GFD = ground). Para obtener el voltaje de fase a tierra,

basta con dividir el voltaje de fase a fase entre $\sqrt{3}$ (para una conexión Y): $13\ 600/\sqrt{3} = 7767$.

Frecuencia: La placa indica que el transformador debe operar a 60 Hz. Esto es muy importante porque el transformador puede resultar seriamente dañado si se usa una frecuencia equivocada.

Tres fases: Esta designación nos dice que las tres fases se encuentran en el mismo contenedor (o tanque). Muchos bancos de transformadores consisten de tres transformadores de fase sencilla conectados de forma trifásica.

Clase OA/FA: Esta simbología indica que el transformador es enfriado. Veamos los tipos básicos de enfriamiento:

CLASE	Descripción y método de enfriamiento.
OA	Inmerso en aceite. Auto enfriado. El transformador es enfriado por convección natural de aceite aislante.
OA/FA	El mismo que el anterior más una corriente de aire forzada.
OA/FA/FOA	Lo mismo que el anterior más una corriente forzada de aceite.
AA	Tipo seco. Auto enfriado.
AFA	Tipo seco. Corriente de aire forzada.
AA/FA	Tipo seco. Auto enfriada/corriente de aire forzada

Aquí no consideramos cuestiones como dependencia de la frecuencia, pérdidas de poder y operaciones no lineales.

Conexiones en el transformador.

Daremos a continuación un resumen de las ventajas y desventajas de las diferentes conexiones de los transformadores.

Delta-delta: Presenta la desventaja de no poder proveer corriente de un corto circuito a tierra, por lo que deben tomarse medidas de forma inmediata o de lo contrario ocurrirá un corto circuito en el secundario. (fig.5a).

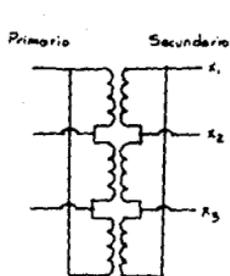
Y-Y: Aunque tiene terminales a tierra, presenta dos grandes desventajas: 1) solo cuenta con voltaje de fase a neutral, y 2) el punto neutral requiere conexiones adicionales y la terminal tendrá 4 alambres (fig.5b).

Delta-Y a tierra: Probablemente la más usada ya que uno de los verticales es una delta y el otro, en caso de corto circuito el secundario tiene conexión a tierra. (fig.5c).

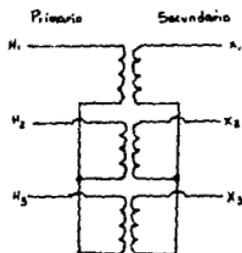
Delta-reactante/resistencia-Y a tierra: Este tipo de circuitos se emplean cuando un corto circuito de gran magnitud es indeseable o peligroso. (fig.5d).

Dos fases-3 alambres: Esta conexión ilustra la forma de desarrollar una fase extra a partir de una fase sencilla de alimentación (muy usada para zonas residenciales).

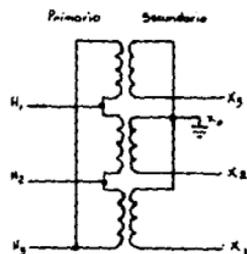
Delta abierta: dos transformadores son alambrados y ellos producen un voltaje de tres fases, es empleado para ahorrar dinero.



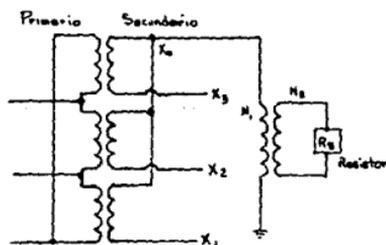
a.- Delta - Delta



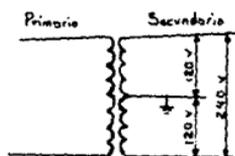
b.- Y - Y



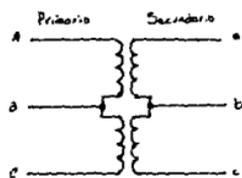
c.- Delta - Y



d.- Delta-impedancia/resistencia



e.- Dos fases, 3 alambres



f.- Delta abierta

FIG. 5. CONEXIONES PARA UN TRANSFORMADOR

MOTORES ELECTRICOS

Los motores consumen la mayor parte de la energía eléctrica de una planta química, es por eso que debemos conocer todo lo relacionado con los mismos. Consideremos pues la importancia de los datos de un motor:

Terminología común para motores eléctricos:

- * Armadura: Elemento rotatorio de la máquina que requiere de un conmutador.
- * Torque al freno: Torque máximo que producirá el motor.
- * Forma de circuito: El circuito puede ser rectangular o cuadrangular.
- * Velocidad de carga máxima: Velocidad a la cual se desarrolla toda la potencia.
- * Torque de carga máxima: Torque requerido para producir la máxima potencia a velocidad de carga máxima.
- * Hertz: frecuencia (ciclos/segundo).
- * Aislamiento: Materiales aislantes que separan las partes que acarrearán corriente de cualquier otra o de la coraza.
- * Bobinado: Se hace con alambre circular.
- * Polos: Número de polos magnéticos dentro del motor.
- * Rango de temperatura: Rango permisible de temperatura sobre la ambiental cuando el motor opera bajo carga.
- * Rotor: Elemento rotatorio de una máquina de inducción.
- * Deslizamiento: Porcentaje de diferencia entre la velocidad sincrónica y la de operación.
- * Estator: Parte estacionaria del motor.
- * Velocidad sincrónica: Velocidad máxima para un motor de c.a. y es igual a la frecuencia multiplicada por 120 y dividida por el número de polos.
- *Torque: Fuerza de rotación producida por el motor en lb-ft.

Examinemos ahora una placa común de motor y analizamos los datos típicos que se presentan:

- * Caballos de fuerza (HP): Es la potencia que el motor puede dar continuamente. Bajo condiciones ambientales estándar, el motor operará indefinidamente.
- * Fases (PH): Indica cuando el motor emplea 1, 2 ó 3 fases de potencia eléctrica.

- * Hertz (HZ): Es la frecuencia de la fuente de energía, generalmente 60 Hz.
- * Tamaño de armazón (FRAME): Referido al National Electrical Manufactures Assn. (NEMA) y designa el tamaño específico y sus dimensiones externas.
- * Voltaje (VOLTS): Indica el voltaje empleado para la operación; podemos esperar un buen funcionamiento con variación del 10% del voltaje.
- * Corriente de carga completa: Corriente desarrollada cuando opera con el voltaje nominal, con la potencia nominal y a velocidad nominal.
- * Código de diseño (DESIGN): Se aplica a las características del torque de las condiciones de arranque a la velocidad desarrollada.
- * Letra código (CODE): Aplica a condiciones de arranque para kVA/Hp, cuando el motor arranca a voltaje completo. Designaciones:

CODE	kVA/Hp	CODE	kVA/Hp	CODE	kVA/Hp
A	0.00-3.14	F	5.00-5.59	L	9.00-9.99
B	3.15-3.54	G	5.60-6.29	M	10.00-11.19
C	3.55-3.99	H	6.30-7.09	N	11.20-12.49
D	4.00-4.49	J	7.10-7.99	P	12.50-13.99
E	4.50-4.99	K	8.00-8.99	R	14.00-15.99

Fuente: NEMA Standards.

- * Factor de servicio (SF): Mide la habilidad del motor para desarrollar una potencia mayor a la nominal. Para encontrar este valor multiplicar los Hp por el FS. Lo mismo aplica para la corriente.
- * Velocidad (MOTOR RPM): Es la velocidad a la cual opera el motor cuando se aplican los Hp nominales.

Tipos de motores.

La selección de un motor de inducción o sincrónico, motor de c.a. o de c.d. se hace siempre en base al costo, aunque otras consideraciones se toman como una regla. Por ejemplo, espacio, partes, facilidad de operación, etc. Veamos ahora los tres grandes tipos de motores empleados y analicemos cada uno de ellos.

TIPO	TAMAÑO, HP
Motores de inducción c.a.	1/8 a 1500
Motores sincrónicos c.a.	200 a 15000
Motores de corriente directa	1/8 a 2000

a) Motor de inducción.

Los motores de inducción (jaula de ardilla) presentan las siguientes ventajas: Tienen un factor de servicio mayor a 1, lo cual es importante cuando la carga "salta" y rebasa el valor de diseño, rotores balanceados, y una gran variedad de métodos de arranque. Son los motores más comúnmente usados en las plantas de procesos químicos, ya que son simples, relativamente baratos, de fácil mantenimiento, eficientes (usualmente por arriba de 90%) y disponibles en tamaños estándar.

Cuando especificamos un motor de inducción, debemos considerar:

* Caballos de potencia (HP): estos se determinan por los requerimientos de operación del equipo.

* Torque de arranque: Una letra en la placa del motor indica cuando se tiene el rango de torque apropiado, la fig.6 muestra estas características de acuerdo a la NEMA. Si empleamos un motor con una letra de diseño diferente a la requerida, ocurrirán problemas si no se hace un análisis cuidadoso del sistema eléctrico.

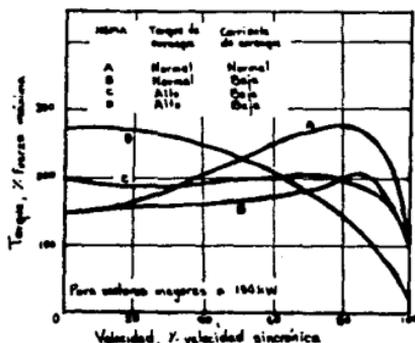


FIG.6.RELACIONES ESTANDAR PARA EL TORQUE DE ARRANQUE.NEMA

* Voltaje: Normalmente pueden conectarse a un voltaje diferente al nominal, siempre y cuando este no varíe en más del 10% ya que el fabricante no proporcionará garantía.

* Tamaño: Debe ser el mismo que el tamaño requerido por la NEMA, de ser necesaria alguna modificación esta debe ser aprobada por la misma norma.

* Corriente de carga total: Corrientes diferentes requerirán del empleo de relevadores protectores adicionales.

* Velocidad: Observense siempre las velocidades de carga total en la placa del motor y considerese el deslizamiento para evitar una diferencia indeseable en el servicio a la carga.

* Coraza o armadura: Se refiere al tipo de envoltura para el motor dependiendo de las condiciones ambientales particulares, así, se tienen cubiertas abiertas, a prueba de goteo, totalmente cerradas, con enfriamiento interno y a prueba de explosión.

b) Motor de corriente directa.

Estos se emplean cuando es necesario tener un control preciso de velocidad y un gran torque a baja velocidad, cuando el arranque así lo requiera. Sus ventajas son: Un control de velocidad simple y barato, flexibilidad en los torques a baja velocidad y una gran eficiencia. Aunque también presenta las siguientes desventajas: Alto costo, comparado con un motor de inducción, altos requerimientos de mantenimiento, una pobre disponibilidad de reemplazo y una fuente de energía de c.d. Debido a estas desventajas, estos motores no se emplean en industrias de procesos químicos.

c) Motor a síncrono.

Este tipo de motores es muy parecido a los de inducción excepto que estos poseen un controlador magnético de c.d. que sigue exactamente a la onda magnética generada cuando la potencia eléctrica trifásica es conectada. Esto da como resultado que el motor funciona exactamente a la velocidad síncrona. La ventaja principal es que controlan el factor de potencia, porque proveen los volt-ampere reactivos, ahorrando la instalación de capacitores para obtener la misma corrección al factor de potencia. Otra ventaja es que desarrollan velocidades constantes, lo cual es muy útil para algunas aplicaciones. Por otra parte requieren de un mantenimiento mayor y son mucho más caros. En las industrias de procesos químicos se encuentran muy pocos y únicamente cuando se requieren varios cientos de HP de potencia.

Cambios en la eficiencia del motor.

Debido a que los motores no operan bajo condiciones constantes, debemos compensar las fluctuaciones en la línea y otros parámetros de diseño. Por ejemplo, los efectos del cambio de voltaje sobre la corriente de carga total, factor de potencia, eficiencia, corriente de arranque y operación se muestran en la fig. 7.

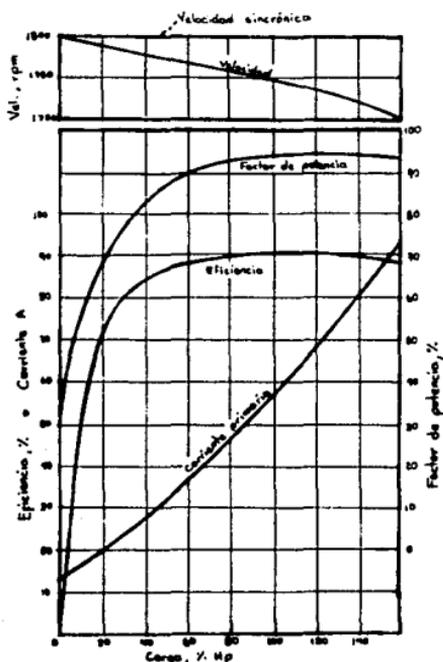


FIG.7. CAMBIOS DE EFICIENCIA EN EL MOTOR.

Controles de velocidad de un motor.

Un desarrollo reciente en la operación de motores de inducción, es el control de velocidad de frecuencia variable. El costo de este instrumento puede cubrirse rápidamente con el ahorro de energía cuando se trata de equipos como bombas centrífugas o ventiladores.

La frecuencia variable acepta cualquier señal de control convencional, tiene tiempo de respuesta rápido, ahorra potencia a flujos bajos y simplifica las tuberías.

Otros controles de velocidad para sistemas industriales son: controles de c.d., unos hidráulicos, de corrientes de Eddy e instrumentos de voltaje variable. La fig. 8 ilustra la eficiencia comparativa de varios instrumentos de control operando en rangos de 50% a 100% del valor nominal de velocidad.

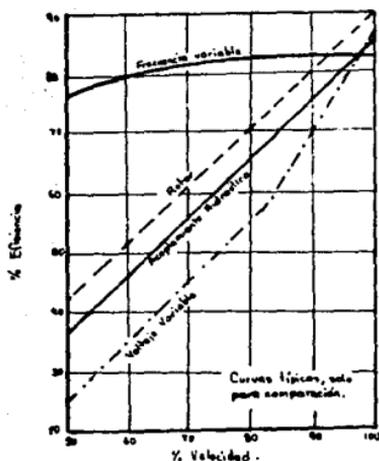


FIG. 8. EFICIENCIAS COMPARATIVAS DE VARIOS INSTRUMENTOS DE VELOCIDAD VARIABLE.

En las siguientes tablas I Y II mostramos, en la primera las aplicaciones típicas de motores para plantas de proceso y una segunda que nos sugiere voltajes para motores.

Aplicaciones típicas	Motores de C. A.										
	Jaula de ardilla con resistor	Jaula de ardilla por sí	Jaula de ardilla por condensadores	Rotor devanado	Síncronico	Síncronico con rotor por sí	Monofásico	Monofásico por sí	Polifásico por sí	Devanado compuesto	C. D.
Aguitadores 1/2 a 15 hp											
Molinos de bola y dragado, 20 800 hp											
Meceladoras (Banbury), 800 a 800 hp											
Batideras, hasta 500 hp											
Sopladores, hasta 500 hp											
Elevadores de caucho, 5 a 25 hp											
Desmenuzadoras, hasta 1 500 hp											
Compresores, hasta 800 hp											
Transportadores, 3 a 100 hp											
Grúas y montacargas, 3 a 150 hp											
Trituradores, 5 a 300 hp											
Extracción, 3 a 180 hp											
Ventiladores, hasta 150 hp											
Moladora (pasta), 1 000 a 4 800 hp											
Embrilladora y granuladora, 1/2 a 30 hp											
Esmeradores, 20 a 300 hp											
"Jordans", hasta 400 hp											
Hornos secadores, 20 a 180 hp											
Molinos, 5 a 500 hp											
Pulverizadores, 10 a 250 hp											
Bombas (centrífugas), hasta 1 000 hp											
Bombas (de pistón), hasta 500 hp											
Trifurcadores, 5 a 300 hp											
Alimentadores de huevos, 5 a 30 hp											

Tipos de arranque

Jaula de ardilla	Magnético, voltaje completo o reducido.
Rotor devanado	Manual, electromagnético o magnético con resistencia en el secundario
Síncronico	Magnético, voltaje completo o reducido
Monofásico	Manual o magnético, voltaje completo.
Corriente directa	Manual o magnético con resistencia en el campo y en el armadura

TABLA I. APLICACIONES TÍPICAS DE MOTORES.

Voltaje nominal del sistema	Motores de potencia no fraccional		Motores de potencia fraccional		Potencia del motor (hp)
	Polifásico	Monofásico	Polifásico	Monofásico	
120	110	115	110	115	hasta 5
120/208 Y	110/220	115	110/220	115	hasta 7 1/2
240	220	230	220	230	1/2 a 2 1/2
480	440	...	440	...	1/2 a 1 1/2
600	550	...	550	...	1/2 a 1 1/2
2,400	2,200	...	...	...	50 y más
4,160	4,000	...	...	...	150 y más
4,800	4,700	...	...	...	250 y más
6,900	6,000	...	...	...	500 y más
13,800	13,200	...	...	...	1,000 y más

TABLA II. VOLTAJES SUGERIDOS PARA MOTORES

ALAMBRES Y CABLES ELECTRICOS

Los alambres y cables son las tuberías eléctricas para transportar energía de la fuente a la carga. Es decir:

a) Mueven energía.- El cable es usado para proveer energía eléctrica a la carga. La energía se desarrolla en generadores y es distribuida para su uso a centros de carga.

b) Proveen estabilidad.- El cable es utilizado para conectar a tierra equipos, manteniendo las partes no energizadas al mismo potencial eléctrico.

c) Proveen información.- El cable se utiliza para transmitir señales de información de todo tipo, interruptores de circuito, telemetría de control de proceso y hasta circuitos simples de teléfono.

Materiales conductores.

Un conductor es un material que permite el paso de la corriente eléctrica fácilmente. Para servicio en electricidad, el conductor debe tener más atributos que el solo hecho de conducir corriente: 1) Debe ser barato, 2) Fácilmente moldeable, 3) Resistente a la corrosión y 4) Fuerte.

El cobre, aluminio y plata son los materiales que reúnen la mayoría de estas características. El conductor más usado es sin duda el cobre, sin embargo en años recientes, el cobre ha empezado a escasear y por lo tanto a encarecerse. Ante este problema, se ha empezado a utilizar el aluminio con gran éxito, aunque presenta dos serios problemas:

- a) Tiende a ser muy sensible a la corrosión en atmósferas salinas.
- b) Los puntos de conexión deben hacerse muy cuidadosamente.

La plata es el mejor conductor de todos pero es muy cara, por lo que solo se emplea para contactos, terminales u otras áreas críticas donde es necesaria una alta conductividad.

Sistemas aislantes.

La porción más compleja de un sistema de conducción de corriente es el sistema aislante, para iniciar la discusión de aislantes, requerimos definir primero algunos términos.

* Semiconductor.- Material que se encuentra entre un conductor y un aislante en términos de resistividad.

* Corona.- Es la ionización del aire alrededor del conductor. Es causada por un gradiente elevado de voltaje en un punto discontinuo, tal como una terminal. Generalmente, no es problema en sistemas de c.a. menores a 1000 volts.

* Tracking.- Carbonización del material aislante por diminutas corrientes que fluyen sobre la superficie del aislante. Estas corrientes se originan através de contaminantes tales como el polvo.

* Efecto de piel.- Es la tendencia del flujo de corriente de concentrarse en la superficie o "piel" del conductor. Este efecto es causado por la concentración de flujo en el centro del conductor que transporta c.a., es una función de la frecuencia y este es mayor a frecuencias más altas.

Cable de bajo voltaje (menos de 1000 volts).

Su construcción es relativamente simple. Un conductor central es rodeado por un material aislante; el material puede tener una chaqueta externa protectora, dependiendo de la aplicación (fig.9a).

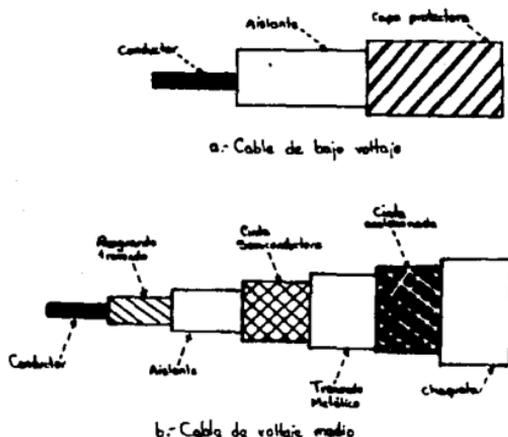


FIG.9. DETALLES DE CONSTRUCCION DE CABLES ELECTRICOS.

Muchos cables empleados para telemetría, comunicación o control son resguardados, es decir, tienen una cinta metálica o malla que lo rodea completamente.

Este resguardo es cubierto con la inajqueta externa y su función es prevenir la formación de campos magnéticos dentro de los conductores de control. Si el resguardo no estuviese presente, podrían producirse grandes picos de voltaje dentro de los delicados circuitos de control.

Cable de voltaje medio

Los sistemas aislantes para el voltaje medio (1000 a 35000 volts) no son simples, como se muestra en la Fig. 9b. Se presenta a continuación una breve descripción de la construcción y el propósito de cada capa:

1) Conductor.- El propósito es transferir energía eléctrica por lo que debe ser un alambre sólido o bien alambres trenzados. El uso de alambre trenzados aumenta el área disponible de conducción disminuyendo el efecto de piel.

2) Resguardo trenzado.- Si el aislante fuese aplicado directamente sobre el conductor, existiría un elevado gradiente de voltaje en la interfase entre el conductor y el aislante. Si llega a haber burbuja de aire (y de hecho las hay) ocurrirá el efecto corona lo cual provoca deterioro y eventualmente falla del sistema, es por eso que debe emplearse un resguardo trenzado de un material semiconductor, el cual provee una disminución gradual de voltaje en lugar de una discontinuidad.

3) Aislante.- Impide el paso de la corriente entre el conductor y las capas externas.

4) Cinta semiconductor.- Si el trenzado metálico fuese colocado directamente sobre el aislante, se desarrollarían gradientes de alto voltaje. La cinta semiconductor ayuda a reducir este gradiente.

5) Trenzado metálico.- Esta capa cumple con los propósitos básicos siguientes:

- Previene descargas eléctricas de cable a tierra.
- Mantiene la impedancia constante, y protege al cable de las oleadas de voltaje.
- Mantiene el exterior del cable a potencial cero, haciendo segura la instalación.
- Provee una curva equipotencial desde el interior, igualando el voltaje variante en el cable. El trenzado debe conectarse a tierra en uno de sus extremos.

6) Cinta acolchonada.- Esta capa es normalmente de tipo plástico y se usa para proteger el cable de daños físicos. Su flexibilidad permite enrollar el cable más fácilmente.

7) Chaqueta.- proporciona protección tanto física como química, así como una mejor protección contra el polvo.

Configuración del cable.

Los cables pueden encontrarse en diferentes configuraciones, tales como tres conductores simples, cable trifásico y conductores metálicos y no metálicos.

La consideración más importante para el ingeniero químico es determinar el tamaño del conductor requerido para el trabajo.

La amperacidad es la capacidad de transportar corriente, expresada en amperes, de un alambre o cable bajo condiciones térmicas establecidas. La amperacidad requerida de un cable se basa en a) amperaje a carga total, b) tipo de aislante, c) técnica de instalación y d) condiciones ambientales.

Terminales del cable.

La mayoría de las fallas en el cable se deben a las conexiones en las terminales o abrazaderas. A continuación una lista de las formas más comunes empleadas para realizar una conexión:

- **Conexión soldada.-** Se emplea para obtener una buena conexión eléctrica. Empleada en electrónica y para medio voltaje.
- **Conexión rizada.-** También llamada a "presión" hay que observar lo siguiente:
 - Emplear un rizo con suficiente presión para asegurar una buena conexión.
 - Usar un inhibidor de corrosión cuando este se requiera. Especialmente importante para rizos de aluminio.
- **Conexiones atornilladas.-** La más empleada de todas las terminaciones, en este caso hay que observar siempre:
 - Usar el torque que asegure una buena conexión en los tornillos, sin forzarlos demasiado.

- Checar los tornillos periódicamente para asegurar que la conexión no ha tenido pérdidas por vibración.
- Poner especial atención en las terminales con metales diferentes. Puede ser necesario emplear conectores recubiertos de plata.
- * Donde protectores: Se instalan sobre los resguardos trenzados del cable para reducir los gradientes de alto voltaje que pueden desarrollarse en las terminales del resguardo.

Consideraciones generales.

El cable es uno de los accesorios eléctricos más empleados. Las siguientes recomendaciones son para obtener una vida larga de servicio sin problemas:

- 1) No usar cables que tengan una amperaje menor a la requerida, es ilegal y peligroso.
- 2) Haga las conexiones cuidadosamente siguiendo las instrucciones.
- 3) Inspeccione los cables y las terminales periódicamente.
- 4) Pruébe el cable periódicamente aplicando un alto voltaje de c.d. sobre el aislante.

INTERRUPTORES ELECTRICOS.

En esta sección cubriremos el equipo empleado para el control de la energía eléctrica y para la protección del sistema eléctrico, mediante la acción de ruptores de circuito (breakers) y/o fusibles para aislar la parte del sistema que ha fallado.

Equipos interruptores.

Los equipos de control y protección denominados generalmente como equipos interruptores, son:

*Ruptores de circuito.

Realizan dos funciones. Pueden interrumpir la corriente a una carga, como un apagador, y cortar la corriente originada por un corto circuito. Los interruptores de circuito tienen una limitante, y es que únicamente tienen un número determinado de veces que pueden operar. El número normal de ciclos, para las corrientes de carga manejadas, es menor a 1000 operaciones, disminuyendo una o dos operaciones cuando la interrupción ocurre muy cerca del límite del dispositivo.

* Controladores.

Son similares a los ruptores de corriente, excepto que están diseñados para interrumpir la corriente decenas de miles de veces, y tienen rangos de interrupción muy pequeños.

* Cercados.

Son normalmente de lámina metálica para equipos de voltaje medio (1000 a 35 000 v). Los cercados son principalmente para seguridad, porque sirven para resguardar las partes energizadas, manteniéndolas limpias y secas.

* Buses.

Aplica para los componentes que acarrean la corriente y sirven para la totalidad de los ruptores o controladores. Los buses se hacen en forma de barra de cobre o aluminio, aunque también puede ser cable.

* Auxiliares.

Incluye instrumentos tales como, relevadores, amperímetros, voltímetros, interruptores de control, etc.

A continuación se enlistan las fallas en los equipos de plantas eléctricas y sus causas probables, en orden decreciente de incidencia:

- Los cables fallan con mayor frecuencia que cualquier otro componente. La razón principal de esto es la falta de control de calidad en la instalación del mismo y sus terminales.
- Motores: fallan principalmente por la humedad y la sobrecarga.
- Equipos interruptores: fallan principalmente por humedad y polvo.
- Transformadores: fallan por humedad y por sobrecarga.

Interruptores de circuito vs fusibles.

La elección de un interruptor de circuito o un fusible, es una decisión en la cual debemos considerar el uso de fusibles cuando el mantenimiento y el capital de la planta son limitados. Si la planta tiene poco mantenimiento o nulo, debemos considerar que después de períodos prolongados de tiempo sin mantenimiento, el fusible seguirá operando de acuerdo con su diseño. La instalación de fusibles es generalmente mejor para que la de interruptores de circuito.

Los siguientes factores están a favor de los interruptores de circuito:

1) Un interruptor desconectará las tres fases de una línea trifásica al mismo tiempo. Es posible que un solo fusible falle (arriete), lo cual puede provocar que un motor se dañe rápidamente si sus equipos de protección no funcionan.

2) Los interruptores pueden interrumpir las fallas de corriente más de una vez, y basta con una inspección visual, después de una falla, para asegurar que no están dañados antes de reestablecerlos.

Controladores e interruptores de circuito.

Otra diferencia entre controladores (algunas veces llamados contactores) e interruptores, es que los controladores son cerrados mediante una bobina que recoge y cierra los contactos del mismo. Normalmente, se emplea c.a. para esta bobina por que es la que está inmediatamente disponible. La c.d. se emplea en gran cantidad de controladores, pero esta es rectificadas a c.a. dentro del controlador.

Los interruptores tienen dos bobinas una para cerrar y otra para abrir el contacto. En los grandes y modernos interruptores, un compresor con motor adicional un resorte que proporciona la energía necesaria para abrir o cerrar el contacto. Las bobinas y los motores son operados con c.d., la cual es alimentada desde una batería de almacenamiento. Bajo condiciones de falla, el voltaje, cercano a la falla, puede caer a un nivel muy bajo, es por esto que las baterías se emplean para asegurar que hay energía para operar los interruptores durante una falla.

El tamaño de las baterías y los niveles de voltaje se basan en:

- 1) Número de interruptores a los que debe servir.
- 2) Luces de emergencia requeridas.
- 3) Periodo de tiempo estimado para reestablecer la corriente.

Ti \acute{o} s de contactores e interruptores.

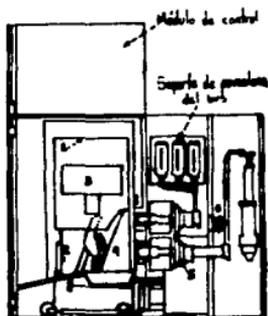
El aire puede emplearse como un aislante. Sin embargo, cuando existe un gran potencial entre dos puntos, el aire es ionizado y puede conducir la corriente, lo cual provoca un arco el \acute{e} ctrico que puede durar indefinidamente. A continuaci \acute{o} n discutiremos los dispositivos usados para controlar la ionizaci \acute{o} n del aire y disminuir la diferencia de potencial entre los elementos de contacto:

* Equipos Aire: magn \acute{e} ticos: Interrumpen la corriente mediante un conducto de arco en conjunto con calor, sopladores de aire, y acci \acute{o} n magn \acute{e} tica, para forzar el arco hacia adentro del conducto. El conducto absorbe el calor del arco y lo obliga a viajar por un sendero largo donde se extingue. Tales equipos son econ \acute{o} micos y se emplean exclusivamente en aparatos con debajo de 1000 v. La fig.10 ilustra uno de estos instrumentos.

* Equipos inmersos en aceite: Interrumpen la corriente por medio de una red y junto con el aceite es forzado a atravesar el arco. El aceite enfr \acute{i} a el arco y la red elonga el arco hasta que este se extingue. Muy pocos interruptores de este tipo se emplean hoy en d \acute{i} a, excepto para aplicaciones externas, ya que requieren mayor mantenimiento que los de aire / magn \acute{e} ticos, pero las razones principales son el costo y el peligro de que el aceite no este contenido durante una falla. La fig.11 muestra el dise \acute{n} o para un gran interruptor (161 kv) de uso externo.

* Equipos al vaci \acute{o} : Interrumpen el arco r \acute{a} pidamente, porque no hay forma de establecer corriente atraves del vaci \acute{o} . De esta forma, cuando el contacto est \acute{a} abierto el vaci \acute{o} contiene el arco en forma muy eficiente. El mantenimiento es extremadamente bajo y el costo es competitivo con el de otros interruptores, el problema que presentan es que no hay m \acute{e} todo positivo de probar si el vaci \acute{o} es el adecuado o ha sufrido alguna fuga. La fig.12 muestra el arreglo interno de un interruptor de botella al vaci \acute{o} de 500 MVA.

Existen otros instrumentos, tales como interruptores de SF $_6$ y mini-interruptores de aceite, pero generalmente no se encuentran en las industrias de procesos qu \acute{i} micos.



- 1- Contacto del aire
- 2- Frente del soporte del contacto del aire
- 3- Lamin de apagado
- 4- Pilo superior de la unidad
- 5- Soporte del contacto catódico
- 6- Soporte de la línea resonante

FIG. 10. INTERRUPTOR DE TIPO AIRE/MAGNETICO.

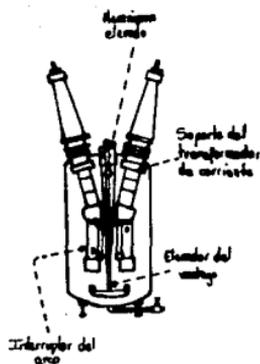


FIG. 11. INTERRUPTOR DE TIPO INMERSO EN ACEITE.

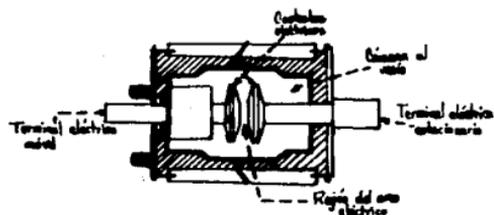


FIG. 12. INTERRUPTOR DE BOTELLA AL VACIO.

Centros de control de motores.

Todos los sistemas de poder (industriales o comerciales), emplean controladores de bajo voltaje. Algunos controladores de gran capacidad pueden tener un voltaje medio (1 a 35 kv), pero los motores (arriba de 200 HP) tienen exclusivamente unidades de bajo voltaje (440 v). Estos equipos de encendido son normalmente del rango de 600 v y cumplen con los requerimientos de NEC para la protección del motor, protección a la alimentación del motor y medios de desconectar el mismo.

Los arrancadores individuales e interruptores para motores eléctricos son generalmente agrupados y contenidos en cajas metálicas que en conjunto se denominan como centros de control de motores (MCC). Estos centros proporcionan la energía y proveen además las características adecuadas de arranque para un grupo de motores eléctricos, teniendo muchas ventajas sobre la instalación de unidades individuales para cada motor. La popularidad de los MCC se debe a las siguientes características:

• **Integral:** Un controlador individual para el motor (es decir, un arrancador) tiene su abastecimiento de energía construido en el MCC. No es necesario otro conductor o alambre para la fuente de poder.

• **Flexible:** Pueden agregarse, removerse o cambiarse nuevos arrancadores sin necesidad de parar el trabajo de la estación de poder.

• **Económicos:** El costo por arrancador es menor cuando se compara con los arrancadores individuales conectados directamente a la fuente de poder.

Para seleccionar un arrancador de bajo voltaje (menor a 1000v), necesitamos la siguiente información acerca del motor: HP, corriente de carga completa y voltaje, el tipo de armadura para resguardar el equipo de control del motor. Este procedimiento puede ser esencial cuando el motor tiene algunos requerimientos inusuales, tales como un ambiente caliente (arriba de 120 F), cargas de arranque "duras" (compresores), o exceden de 100 HP (para motores de 460 v).

Finalmente la selección de un equipo interruptor puede ser compleja, es por eso que deben tenerse en cuenta los siguientes factores: Carga, es decir, flujo de corriente nominal, corriente disponible de corto circuito, arrancadores de motor o interruptores de circuito, armaduras, dispositivos de protección, es decir fusibles o relevadores/interruptores, tamaño de cables a la entrada y salida del equipo interruptor, número de unidades, nivel de voltaje y protección adicional.

ILUMINACION EN PLANTAS DE PROCESO.

Las buenas técnicas de iluminación siempre ahorran energía y crean además mejores condiciones de trabajo, lo cual incrementa la producción y disminuye los accidentes.

Los requerimientos mínimos de iluminación han sido reducidos drásticamente en estos últimos años, principalmente por problemas de energía, incluso en áreas no críticas como estacionamientos, se empiezan a emplear celdas fotoeléctricas para iluminación.

Un buen procedimiento para analizar cualquier problema de iluminación es: 1) determinar los requerimientos de iluminación y 2) analizar el capital, instalación y costos de energía.

Recordemos ahora las unidades primarias asociadas con la iluminación:

- Candela: cd, es la intensidad luminosa, en la dirección perpendicular, de una superficie de $1/600000\text{m}^2$ de un cuerpo negro a la temperatura de congelación del platino y una presión de 101.325 N/m^2 .

- Lumen: lm, es la unidad de flujo luminoso y es igual al flujo en una superficie unitaria, en la cual todos los puntos se encuentran a una distancia unitaria de una fuente puntual de una candela.

- Pie-candela: fc, se define como la iluminación producida en una superficie, en la cual todos los puntos están a una distancia de un pie de una fuente puntual de una candela.

Guía para iluminación.

Para garantizar la iluminación adecuada en una planta de proceso, cuarto de control y auxiliares, es necesario efectuar un análisis como el siguiente:

- 1) Determinar los requerimientos de iluminación y factores operacionales.
- 2) Seleccionar la lámpara.
- 3) Seleccionar la instalación eléctrica.
- 4) Calcular el número de instalaciones.
- 5) Determinar la colocación de la instalación.
- 6) Hacer un arreglo.

Para determinar los requerimientos de iluminación del área se debe consultar tablas. Los factores operacionales son una compilación del NEC, sobre todo, los relacionados con el diseño para áreas peligrosas y no peligrosas.

Selección de lámparas.

Muchos otros factores intervienen en la selección de la lámpara y de la instalación, además del propósito principal que es la iluminación. Por ejemplo, el color puede ser necesario para identificar equipos por seguridad y propósitos operacionales. La tabla III muestra las características de color de varios tipos de lámpara. Otros factores que afectan la selección de la lámpara incluyen: consumo de energía, vida de la lámpara, y temperatura de operación. Algunas de las características para las lámparas más comunes disponibles en el mercado se encuentran en la tabla IV.

TABLA III. CALIDAD DE COLOR DE FUENTES DE LUZ.

TIPO LAMPARA	CARACTERISTICAS.
Vapor de sodio de baja presión	Su luz es prácticamente amarilla, los objetos iluminados parecen ser amarillos, grises o negros. No es recomendable para la iluminación dentro de las plantas de proceso, más bien se recomienda para áreas iluminadas.
Vapor de sodio de alta presión	Presentan un color predominantemente amarillo con algo de rojo y pequeñas cantidades de azul y gris, el color parece dorado. Se localizan de preferencia en áreas de proceso donde el color no es crítico en la iluminación.
Haluro metálico	Tienen un espectro de color balanceado, que produce un color cercano al blanco. Posee un rendimiento de color excelente.
Vapor de mercurio	Una lámpara de mercurio transparente da un color gris-azulado. Con recubrimiento de fósforo produce más rojo. Este tipo de lámpara es recomendado para los requerimientos de la planta de proceso.

TABLA III (continuación)

Fluorescentes	Con un recubrimiento de fósforo se proveen de un rendimiento excelente de color, y son recomendables para la iluminación de plantas de proceso.
Incandescentes	Las lámparas incandescentes dan esencialmente una luz blanca y son recomendadas para requerimientos de color más exactos.

TABLA IV.- CARACTERISTICAS DE OPERACION DE FUENTES DE ILUMINACION COMERCIALES

P W	LAMPARA	SALIDA lm	MEDIA lm/w	VIDA MEDIA h	TIEMPO DE ENCENDIDO	COLOR
1000	Incandescente	23740	24'	1000	0	excelente
500	Iodo-cuarzo	10600	22	2000	0	excelente
100	Vapor de Hg	3780	34	24000	5-8 min	buena
175	Haluro metálico	10800	53	7500	5-8 min	excelente
250	Vapor de Na de alta P	22700	82	15000	3-4 min	pobre
55	Vapor de Na de baja P	7497	94	18000	10-15min	pobre
150	Incandescente (servicio largo)	2300'	15	2500	0	excelente
150	Incandescente (servicio rudo)	2160'	14	1000	0	excelente

TABLA IV (continuación)

250	Vapor de Hg autobalastada	6500	26	12000	0	excelente
40	Fluorescente (luz de día)	2410	52	15000	0	excelente
40	Fluorescente (blanco frío)	2960	64	15000	0	excelente

'lumen iniciales.

Características de las fuentes de iluminación:

- Incandescente.** - Es el mayor consumidor de energía. Bueno para operaciones menores a 400 h/año.
- Iodo-cuarzo.** - Fuente de luz ineficiente, solo recomendada para operaciones menores a 400/año y aplicaciones especiales. Su instalación eléctrica opera a alta temperatura.
- Vapor de Hg.** - Larga vida, propia para interiores y exteriores, su instalación es pequeña y compacta. Recomendable para líneas de tubería de proceso y andadores.
- Haluro metálico.** - Lo mismo que las de vapor de mercurio, solo que estas tienen mejor eficiencia y color.
- Vapor de Na de alta presión.** - Recomendable para estacionamientos e iluminación de calles.
- Vapor de Na de baja presión.** - Para áreas de estacionamiento, iluminación de calles, etc. Tiene la mayor eficiencia en lumen de todas las lámparas eléctricas. El color es una seria limitación.
- Incandescente (servicio prolongado).** - Larga vida para ser incandescente, se recomienda para operaciones menores a 400 h/año y es la más económica cuando la iluminación no se necesita continuamente.
- Incandescente servicio rudo.** - Para iluminación extensa y servicios de alta vibración. Costo de 64% mayor y ofrece 6% menos iluminación que las lámparas de servicio prolongado.

- Vapor de Hg, auto balastrada.- Reemplazan a las incandescentes cuando el tiempo de operación es mayor a 400 h/año. Emplea 17% menos potencia y emite 9% más que una lámpara incandescente de 300w
- Fluorescente (luz de día).- NO se recomienda.
- Fluorescente (blanco frío).- Es la mejor para oficinas y para alturas de montaje bajas y presenta una vida larga.

Conservación de la energía.

La iluminación es un fuerte consumidor de energía en las industrias de procesos químicos, y una de las consideraciones que deben tenerse, es la energía que utilizan los equipos de iluminación. Para reducir el consumo de energía usado por iluminación, debemos de:

- 1) Usar lámparas de sodio, siempre que sea posible, como una primera elección.
- 2) Seleccionar lámparas de haluro-metálico como una segunda elección, seguida por fluorescentes y por las de vapor de mercurio.
- 3) Usar elementos que aumenten la eficiencia como reflectores y difusores.
- 4) Poner atención en el espaciamiento y la altura de las lámparas.
- 5) Para iluminar grandes áreas uniformemente, emplear niveles elevados de pie-candela.
- 6) Emplear iluminación suplementaria, cuidadosamente localizada para áreas de visión crítica.
- 7) Maximizar la flexibilidad de interruptores para fluorescentes, incandescentes y lámparas de cuarzo.
- 8) Usar celdas fotoeléctricas para lámparas de alta densidad de descarga que se encienden normalmente durante las horas de oscuridad.
- 9) Limpiar los accesorios fijos periódicamente.
- 10) Desconecte las luces cuando no se necesitan.
- 11) Reduzca los niveles de iluminación en áreas no productivas.

En la Fig. 17 se muestra una gráfica en la cual se comparan los costos de iluminación totales para varias fuentes de luz.

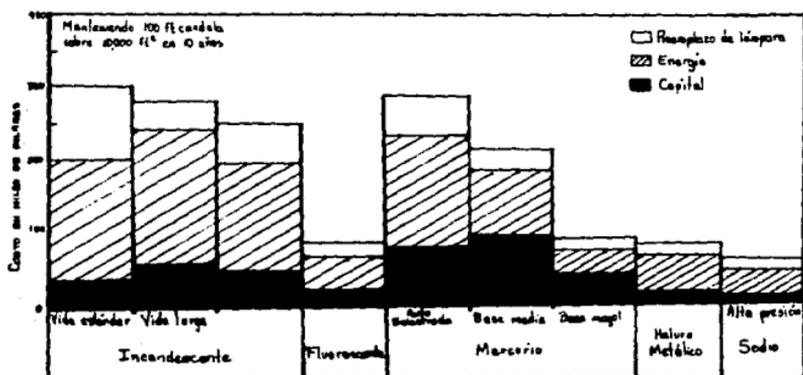


FIG. 17. COSTOS DE ILUMINACIÓN TOTALES.

Protección contra sobretensión eléctrica.

En un sistema de poder eléctrico, las dos fuentes principales de sobrevoltaje son la iluminación y sobrecarga por arranque o paradas de equipo eléctrico. La frecuencia normal es de 60 Hz, por lo tanto es con la tierra, y puede ser tan alto como 50 veces el valor normal. El frente de onda del voltaje cae a lo largo del conductor y puede causar fallas en el aislamiento y otros problemas desde el punto donde es tan grande como el nivel de voltaje básico de una pieza de equipo.

La sobretensión por arranque en el caso de un interruptor rápido de la corriente, y la sobrecarga por arranque de los motores de inducción, se puede evitar al instalar la protección de voltaje de una línea de energía. La protección del equipo eléctrico de la sobrecarga y el arranque surge de la interacción de iluminación y sobrecarga de arranque de los motores eléctricos.

* Arrestadores de iluminación.- Permiten la descarga de sobretensión a tierra, y evitan el voltaje normal, forzando una corriente alta a través del mismo. Son similares en su operación a las válvulas reguladoras de presión. Comercialmente, se dispone de dos tipos de arrestadores: de válvula o de expulsión (que no es muy usado en plantas industriales). Los arrestadores son clasificados como: de estación, de línea de distribución y secundarios.

* La selección de un protector de sobretensión del tipo de selección de niveles de impulso básico y sistemas de tierra, depende de las características físicas, que son dadas por el fabricante. La protección para sobretensión de equipo incluye: 1) Coordinación de niveles de impulso básico, 2) arrestadores de niveles de voltaje, 3) tipo de equipo protector, y 4) localización del equipo protector.

La coordinación de los niveles de impulso básico lo hacen normalmente los vendedores. Para elegir un arrestador de nivel de voltaje debe conocerse:

- El sistema de voltaje de fase a fase.
- Sistema de conexión a tierra (los arrestadores se eligen por aterrizado, incluyendo la resistencia de aterrizado o sistemas bajo tierra).
- BIL (nos da el voltaje que puede tolerar el equipo)
- Localización del sistema protector. Normalmente cerrados para el equipo protegido.

La protección del equipo, edificios y personal de chispas provenientes de la iluminación, en plantas de industrias de procesos químicos consiste primariamente de postes de iluminación, zonas de protección de torres altas, mástiles, etc. (fig.14), y mástiles con alambres interconectados.

Una fuente excelente de información para el diseño y protección de edificios, chimeneas, tanques y torres es el Código de Protección para la Iluminación (Lighting Protection Code).

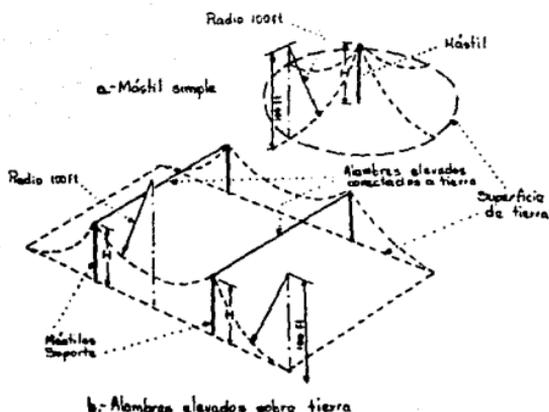


FIG. 14. ZONAS DE PROTECCION DE TORRES ALTAS - MASTILES DE ALUMBRADO.

MECANISMOS DE PROTECCION ELECTRICA.

Las fallas eléctricas (cortocircuitos) y sobrecargas ocurrirán, aún cuando se empleen los mejores programas de mantenimiento e ingeniería. Cuando las fallas ocurren, deben aislarse del sistema eléctrico tan rápidamente como sea posible.

Este "aislamiento" es el trabajo de los mecanismos de protección eléctrica. Al ocurrir la falla, el dispositivo protector detecta la falla y opera un "desenergizador" en el sistema eléctrico que presenta el problema.

Todos los protectores eléctricos caen en dos categorías fundamentales: de acción directa y de acción indirecta.

• Dispositivos de acción directa. - En un nivel bajo, por sí mismos operan para abrir el circuito. Se trata de un esta categoría los interruptores de circuito de alta potencia, fusibles e interruptores de alta potencia de voltaje.

* Dispositivos de acción indirecta: no abren el circuito por sí mismos. Abren o cierran una serie de contactos (o un rectificador de silicona) que a su vez pasa a un interruptor de circuito separado. Un dispositivo típico de esta categoría es un relevador de protección.

Principios de operación:

Siendo directo o indirecto, todos los protectores eléctricos derivan sus características de uno o de la combinación de cuatro principios básicos: 1) Térmico, 2) Electrónico, 3) Atracción electromagnética, y 4) Inducción electromagnética.

1) Térmico.- Los aparatos que operan en el principio térmico son de dos estilos diferentes. En uno, una corriente anormalmente elevada pasa a través de un enlace metálico causando su fusión, abriendo el circuito, esto es un fusible. En el otro, la corriente excesiva calienta un listón bimetalico o un pote soldado. En el tipo listón bimetalico, las tiras liberan el mecanismo y abren los conductos (fig.15a). Si una sobre corriente se desarrolla sobre el pote soldado (fig.15b), el calor derrite la soldadura, liberando el resorte que empuja el armadura hacia la izquierda y el contacto se abre.

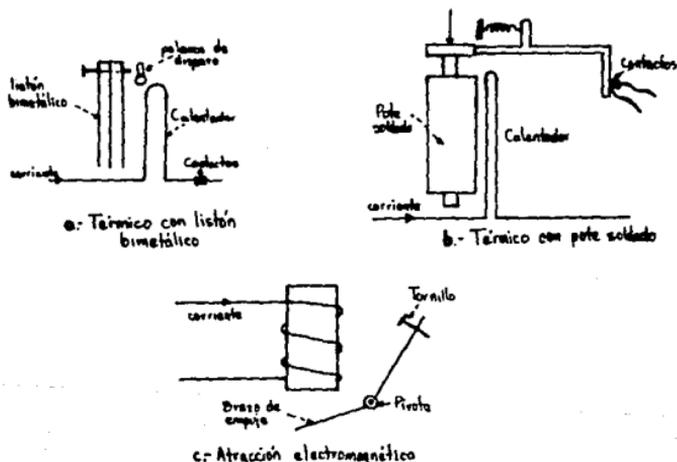


FIG. 15. PRINCIPIOS BÁSICOS DE OPERACION

2) Electrónico.- Un análisis detallado del circuito escapa del contexto de este capítulo. Sin embargo el concepto de un protector electrónico es muy simple. Se alimentan parámetros eléctricos del sistema, tales como corrientes, voltajes y frecuencias, al protector cuyos componentes electrónicos detectan cualquier desviación peligrosa y producen una señal para desenergizar cuando se requiera.

3) Atracción electromagnética.-Este dispositivo emplea electromagnetismos simples como se muestra en la fig.15c. Cuando la corriente del sistema se vuelve anormalmente grande, el brazo es atraído hacia la bobina. El tornillo desenergizador acciona una barra desenergizadora y libera la energía almacenada en un resorte que abre el circuito. Si el tornillo es reemplazado por un par de contactos, el dispositivo se transforma a uno de acción directa.

4) Inducción electromagnética.- Dos o más campos magnéticos actúan sobre un disco, copa o rotor para producir un torque (exactamente como en un motor de inducción). El mecanismo produce una acción desenergizadora cuando los campos tienen la magnitud suficiente y la relación correcta de fase a ángulo.

Protectores eléctricos.

Fusibles.

Posiblemente el más familiar de todos los protectores eléctricos, los fusibles son unidades de acción directa y operan en el principio térmico. Un fusible es colocado en serie directamente con el circuito que debe proteger. Cuando la corriente rebasa la capacidad del fusible, el enlace metálico dentro del fusible se funde, abriendo el circuito. Esta operación no es instantánea, y el tiempo requerido es una función de la magnitud de la corriente. Al aumentar la corriente, más rápidamente opera el fusible.

Los tres puntos más importantes para seleccionar y aplicar un fusible son:

- La corriente de operación del fusible será la corriente máxima en que opera el fusible sin fundirse.
- El voltaje aplicado será el voltaje máximo al cual el fusible debe emplearse.

- El rango de interrupción es la corriente máxima a la que el fusible interrumpirá, cuando se aplica en un circuito a su rango de voltaje.

Los fusibles tienen diferentes configuraciones, una de ellas tiene especial interés para nosotros y son:

- Fusible de elemento dual.- El cual tiene dos elementos en serie, como se muestra en la fig.16. Uno de los elementos es de gran tamaño y acción lenta que responde a valores bajos de sobrecarga, el otro elemento es de acción mucho más rápida y responde solo a los valores altos de sobrecarga. El propósito del fusible de elemento dual es la protección al motor. El elemento grande provee suficiente tiempo de retraso para conducir la corriente de arranque del motor. El enlace rápido no opera durante el arranque, pero opera a gran velocidad para fallas de valor elevado.

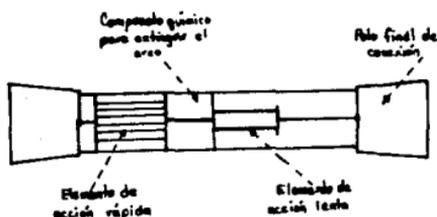


FIG. 16. FUSIBLE DE ELEMENTO DUAL

- Fusible limitante de corriente.- Este es otro tipo de configuración de un fusible. Es de respuesta tan rápida, que puede fundirse en tan solo 2 ms y extingue completamente un arco en 4 ms. Debido a esta velocidad, la falla de corriente no tiene tiempo de alcanzar su valor máximo, de ahí el nombre de limitante de corriente.

Interruptores de circuito de cubierta moldeada (ICCM).

Los ICCM son otro ejemplo de protectores eléctricos de acción directa. El National Electrical Code (NEC) define el interruptor de circuito como un "dispositivo diseñado para abrir y cerrar un circuito por medios no automáticos y para abrir el circuito automáticamente a una sobre corriente predeterminada, sin perjudicarse a sí mismo cuando aplica en su rango".

Mientras que no todos los ICCM tienen un desenergizador automático (algunos se usan solo como apagadores), la gran mayoría lo tienen, y operan en cualquiera de estas dos acciones:

- El interruptor solo magnético : Opera en el principio de atracción electromagnética. Cuando la corriente rebasa su valor de operación, es instantáneamente interrumpida (aquí instantáneamente = sin tiempo de retraso intencional).

Este tipo de interruptores se encuentran usualmente en arrancadores de motor magnéticos. Sirve como un interruptor y a la vez protege el motor de cualquier falla de alto voltaje.

- El interruptor térmico-magnético : Combina el interruptor instantáneo y un interruptor térmico (banda bimetálica) de tiempo de retraso para protección de sobrecargas. Este tipo es el más familiar para usar como un interruptor de circuito de panel iluminado.

En los últimos años los ICCM se han vuelto más sofisticados. Están ahora disponibles con obstrucción electrónica, se ajustan fácilmente y son más útiles que los diseños anteriores.

Interruptores de circuito de bajo voltaje (ICBV).

Debido en primera instancia a la no ajustabilidad de los mecanismos básicos, los interruptores de circuito de bajo voltaje son usados frecuentemente en partes críticas de los sistemas de poder eléctrico. Se les encuentra en circuitos de 480 v. Adicionalmente tienen otras características versátiles el ICEV esta disponible con cuatro tipos de características de interrupción através del uso de mecanismos intercambiables.

Estas características son:

- Tiempo de retraso largo (LTD).- Se emplea para protección de sobrecarga. Su "pick-up" (valor mínimo de operación) es ajustable sobre un rango del 30% al 160% de el rango del dispositivo. Para una sobre corriente dada, el LTD puede requerir de varios segundos o decenas de segundos para operar.

- Tiempo de retraso corto (STD).- Este es un tipo de protector muy rápido, aunque tiene algo de tiempo de retraso. El STD nunca debe requerir de más de 0.5 s para operar con corrientes sobre su valor mínimo de operación. Estas corrientes serán de 2 a 10 veces el rango continuo del aparato. El STD se usa donde se desea un desenergizado selectivo con elementos instantáneos.

- Instantáneo.- Este mecanismo protector de falla opera sin tiempo de retraso intencional, usualmente es ajustable sobre 10 ó 15 veces su rango nominal.

- Falla a tierra.- En sistemas de distribución donde las fallas resultan en un arco eléctrico a tierra (de más de 277 v), la protección de falla a tierra cobra gran importancia. El tiempo de respuesta es similar a un STD, el dispositivo falla a tierra es conectado de forma que solo detectará cargas desbalanceadas o fallas a tierra. Un diagrama típico para un circuito de tres fases y con falla a tierra es el mostrado en la fig.17.

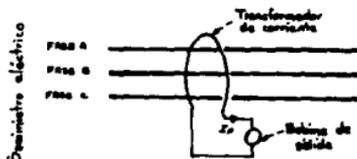


FIG.17. CIRCUITO DE 3 FASES Y FALLA A TIERRA.

Durante la operación normal, la corriente de falla, I , en el dispositivo es cero. Cuando un desbalance ocurre, I , tomará algún valor finito de desenergizado.

En los nuevos diseños de los ICBV usan componentes electrónicos para detectar las fallas. Los antiguos modelos empleaban atracción electromagnética. Los tiempos de retraso se obtenían empleando unidades neumáticas o un "dashpot". Este último es un simple cilindro lleno de aceite, un pistón se sumerge en el aceite y se enlaza con una flecha que a su vez se conecta con una unidad de atracción electromagnética. Cuando la unidad actúa, el pistón debe moverse en contra de la resistencia del aceite, lo cual provee un tiempo de retraso.

Relevadores para sistemas de protección.

Los relevadores son aparatos instalados en un sistema eléctrico para detectar mal funcionamiento. En caso de una falla, el relevador completa una separación del circuito, para desenergizar el interruptor de circuito asociado para aislar la falla. Los relevadores más comunes en una planta son: El relevador de sobrecarga del motor (MOR) y el relevador de sobrecorriente de disco de inducción.

El MOR se encuentra usualmente en el arrancador del motor. Opera en el principio térmico (con bimetálico o pote soldado) o en el principio magnético (dashpot).

El relevador de sobrecorriente clásico opera por inducción electromagnética. En apariencia, es muy parecido a un medidor de watts (de hecho muchos ingenieros que no conocen su uso se refieren a él como "el medidor").

El relevador de sobrecorriente opera aplicando dos flujos de salida de fase en un disco de aluminio. Muchos de estos aparatos tienen además un accesorio de acción instantánea que opera en el principio de atracción. Este tipo de relevador es fácilmente ajustable para varios parámetros eléctricos y es en extremo versátil.

Existen otros tipos de relevadores que se encuentran en sistemas típicos de poder:

- Relevador diferencial: Este relevador monitorea el flujo de corriente dentro y fuera de una porción dada de el sistema llamado zona de protección. Cuando las dos corrientes no son las mismas, corte el circuito porque es anormal o una condición de falla.

- Relevador de subvoltaje: Cuando el voltaje del sistema cae debajo del nivel permisible, ciertas piezas y aparatos (motores, por ejemplo) pueden dañarse. Un relevador de subvoltaje detecta esta condición y opera desconectando los equipos críticos que puedan dañarse.

MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE SISTEMAS ELECTRICOS.

La información que aquí se presenta, da el punto de partida para organizar un programa de mantenimiento preventivo que asegure una línea confiable para un sistema eléctrico de planta.

Cuando sucede una falla eléctrica, el mantenimiento de la planta o personal de electricidad utilizado hará pruebas de aislación de los componentes eléctricos, aplicando un voltaje a todos los componentes. La falla del equipo y otros componentes que no pasen la prueba serán separados o reemplazados. Sin embargo, los problemas propios de un mantenimiento correctivo son:

- El programa de mantenimiento se extiende más allá de un dispositivo.
- El tiempo de falla es impredecible.
- Cuando ocurre la falla en el equipo de poder, el personal será lastimado o herido con el alto voltaje del sistema.
- El equipo protector, diseñado para evitar parte de las fallas del sistema de poder, debe funcionar correctamente, en una secuencia, para minimizar el daño.
- El equipo protector no es probado bajo condiciones de carga normal, las cuales se hacen para materiales aislados. De hecho, la mayoría de los componentes que deben operar durante una falla, no funcionan bajo condiciones normales de operación o cuando es probado el sistema.

La mayor dificultad para establecer un mantenimiento preventivo es justificar su costo. El menor costo total anual será realizado por un mantenimiento que tenga una frecuencia de inspección que mantenga la suma de los costos de mantenimiento, y los costos reparación/reemplazamiento, en un valor mínimo.

Mantenimiento preventivo.

Para iniciar un mantenimiento preventivo debe:

- 1.- Reunir todos los libros de instrucciones, listas de partes, etc. para todos los equipos eléctricos y archivarla.
- 2.- Lista de todo su equipo. Identificar cada pieza con un código numérico, especialmente en aquellas plantas con varios componentes idénticos.
- 3.- Determine los requerimientos de mantenimiento y periodos de tiempo para inspección recomendados por fabricantes.
- 4.- Requerimientos de personal y presupuesto.

En este trabajo no se presentan detalles de los procedimientos de inspección para todos los equipos en un sistema eléctrico; la siguiente relación indica la mayoría de los componentes que establecen un sistema de distribución, junto con los intervalos para inspección y mantenimiento.

COMPONENTE	FRECUENCIA
I.-SISTEMA DE DISTRIBUCION.	
1.-Equipo elevado	
-Inspección visual para defectos obvios como: conexiones, aisladores, arrestadores de iluminación, y otros equipos montados como, focos, transformadores, etc	mensual
-Inspección infrarroja.	c/6 meses
II.-INTERRUPTORES DE ALTO VOLTAJE.	
1.-Inspección visual e infrarroja de las conexiones switch-contacto. Reportar anomalías.	mensual
2.-Operar como mínimo 5 veces, chequeando alineamiento y otros parámetros de operación.	anual
3.-Instrucciones de lubricación del fabricante.	anual

Continuación.

III.-TRANSFORMADORES DE PODER.

- | | |
|--|---------|
| 1.-Porcentaje registrado de gas combustible en transformadores con relleno de nitrógeno. | mensual |
| 2.-Efectuar inspección visual del transformador cerrado. Registro de todos los niveles y operación de aereación. Checar la posición de calda para el sistema de presión. | mensual |
| 3.-Funcionamiento y registro estándar de pruebas del doble devanado del transformador, incluyendo pruebas ultrasónicas a través del devanado, corriente de excitación, y capacitor abrazadera. | anual |
| 4.-Funcionamiento y registro de acidez, tensión interfacial, dieléctrico, y ppm de agua en pruebas de resistencia. | anual |
| 5.-Funcionamiento y registro de pruebas de resistencia del devanado. | anual |
| 6.-Checar operación de rapidez de reemplazo de presión. | anual |
| 7.-Forro saturado del tapón central. | anual |
| 8.-Funcionamiento y registro de pruebas de velocidad de desviación. | anual |

IV.-RESISTORES NEUTRALES.

- | | |
|--|---------|
| 1.-Medir y registrar la corriente neutral. | mensual |
| 2.-Inspección visual, registrar anomalías. | mensual |
| 3.-Medir y registrar factor de poder de aislación. | anual |
| 4.-Medir y registrar resistencia a tierra y conducción a tierra. | anual |
| 5.-Medir y registrar resistencia del resistor. | anual |

V.-INTERRUPTORES DE CIRCUITO DE VOLTAJE MEDIO.

- | | |
|---|---------|
| 1.-Inspección visual del interruptor, cubículo y relevo para registrar número de operaciones, calda de relevo y operación a temperaturas altas. | mensual |
| 2.-Limpieza, ajustes mecánicos y lubricación. | anual |

Continuación.

3.-Medir y registrar resistencia de contacto.	anual
4.-Pruebas de funcionamiento del factor potencia en cada forro, y pruebas ultrasónicas através del arco conductor.	anual
5.-Limpiar cubículo, checar listón de calor y todos los engranes mecánicos.	anual
6.-Listones e interruptores cerrados, desde todas las fuentes posibles.	anual
7.-Medir y registrar el voltaje mínimo del listón.	anual
8.-Medir y registrar resistencia a aislación de todos los controles del circuito, alambrado y aceites.	anual
VI.-RELEVOS PROTECTIVOS.	
1.-Limpiar, ajustar y calibrar con las instrucciones del fabricante o con los procedimientos del NEMA.	anual
VII.-SECCIONES CON FUSES DE MEDIO VOLTAJE.	
1.-Remover paneles e inspección visual, ultrasónica e infrarroja de todas las barras.	anual
VIII.-SISTEMAS DE BATERIAS.	
1.-Inspeccionar visualmente las baterías y recargadores de baterías. Reportar anomalías.	semanal
2.-Adicionar el agua requerida. Reportar cantidad adicionada.	semanal
3.-Registro de velocidad de carga y voltaje.	semanal
4.-Medir y registrar voltajes de celda individual y gravedad específica. Limpiar según instrucciones del fabricante	trimestral
IX.-INTERRUPTORES DE VOLTAJE MEDIO DE EDIFICIOS.	
1.-Inspección visual del edificio.	mensual
2.-Registro de todos los relevos y alarmas.	mensual

Continuación.

3.-Registro de condiciones del alumbrado y lámparas no inflamables.	mensual
4.-Registro de todos los medidores.	mensual
5.-Reemplazo de luces indicadoras defectuosas, y registro de sus circuitos.	mensual
X.-INDICADORES.	
1.-Verificar su escala con un estándar de laboratorio.	anual
XI.-ARRESTADORES DE ILUMINACION.-	
1.-Funcionamiento a baja potencia, aislación y pruebas de factor de potencia.	anual

Además de las pruebas de examinación, mencionadas en la tabla anterior, existen otras de barrido infrarrojo y análisis cromatográfico. Estos son métodos recientes para el mantenimiento preventivo y requieren de equipo especializado.

CAPITULO VI

INSTRUMENTACION Y CONTROL

Las industrias de proceso no podrían existir sin instrumentos que indicarán, registrarán, controlarán y, en algunos casos, se anticiparán a los muchos cambios que ocurren en un proceso. Aún en procesos que requieren de operación manual, los instrumentos le avisan al operador cuándo se debe dar vuelta a una válvula u oprimir un botón.

Toda selección, aplicación y compra de instrumentos debe ser dirigida por un ingeniero en instrumentación, para proporcionar una instrumentación apropiada, el ingeniero debe estar completamente familiarizado con todas las fases del proceso, sus características fundamentales, y la aplicación o función de todo el equipo de proceso. Todos estos fundamentos básicos para instrumentación, sólo un ingeniero químico los conoce a fondo, por ello consideramos que un conocimiento general sobre instrumentación será de gran utilidad, para el desempeño profesional del ingeniero químico.

CONCEPTOS BASICOS, TERMINOLOGIA Y TECNICAS PARA EL CONTROL DE PROCESOS.

Un proceso es identificado por tener una o más variables asociadas con este, y es importante conocer sus valores para poder controlarlas.

Los parámetros que indican la calidad de un producto o las condiciones de operación de un proceso, son llamadas variables controladas, tales como la temperatura, la presión, el nivel, el pH, la gravedad específica o densidad, composición, contenido de humedad, peso y velocidad, y otras variables dependiendo del proceso.

Las variables manipuladas incluyen la posición de la válvula, posición del regulador de tiro, velocidad del motor, etc. Por lo tanto un lazo de control es a menudo, manipulado por otras variables controladas en un esquema de control más complicado.

Todas las variables que afectan a la variable controlada, aún más que las variables manipuladas, son definidas como variables de carga.

Las relaciones entre las variables controladas, manipuladas y de carga restringen la necesidad de un control de proceso. Los cambios en la variable controlada reflejan el balance entre las variables de carga y las manipuladas.

Generalmente el problema de control, es determinado por el valor de la variable manipulada, estableciendo un balance entre todas las influencias sobre la variable controlada y el valor deseado. El problema de control puede ser solucionado en dos formas: a) Sistemas retroalimentados o b) Sistemas de alimentación directa.

Sistemas de alimentación directa.

En este sistema la señal es generada, basando su valor en varias variables de carga y como afectan al proceso. El diagrama de bloques del esquema de control se muestra en la fig.1. El transmisor mide el valor de la variable de carga, y calcula en la unidad de computo la señal correcta de control para las condiciones de carga existentes y el valor de referencia. En general esta tecnica es más complicada y más extensa, solo se usa en grandes procesos.

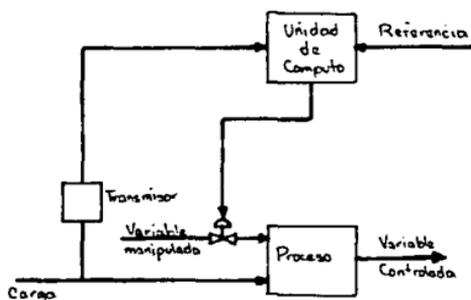
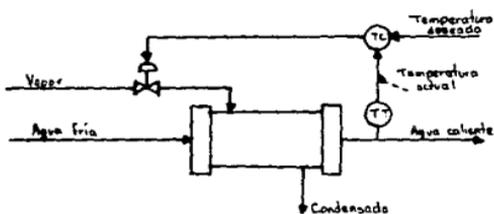


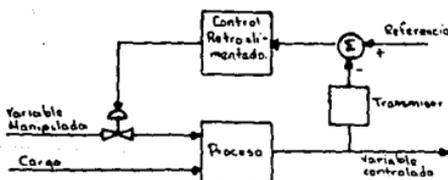
FIG.1. SISTEMA DE CONTROL DE ALIMENTACION DIRECTA.

Sistemas de retroalimentación.

Los sistemas de retroalimentación son los más comunes. La estructura del lazo de retroalimentación se muestra en la Fig.2. Este sistema genera una señal de control basada en la diferencia entre el valor medido y el de referencia, es decir, el valor de la variable controlada es la respuesta a un cambio neto de las cargas y la variable manipulada. El sensor/transmisor mide el valor de la corriente de la variable controlada y manda una señal al controlador retroalimentado, donde la señal se compara (por sustracción) con el valor de referencia. La función de control, dentro del controlador, genera una señal que cambia la posición de la válvula en base a la señal y magnitud de la diferencia entre la medida y el valor fijo.



a. Proceso y variables



b. Lazo retroalimentado

FIG.2. ESTRUCTURA DE UN LAZO DE CONTROL RETROALIMENTADO

Controladores retroalimentados.

Todos los controladores retroalimentados tienen ciertos elementos comunes (fig.3). La función del control retroalimentado siempre tiene 2 entradas y una salida. Una entrada es la señal medida que va al transmisor, la otra es el valor de referencia, llamada punto fijo (set point), y usualmente representa el valor deseado de la medida.

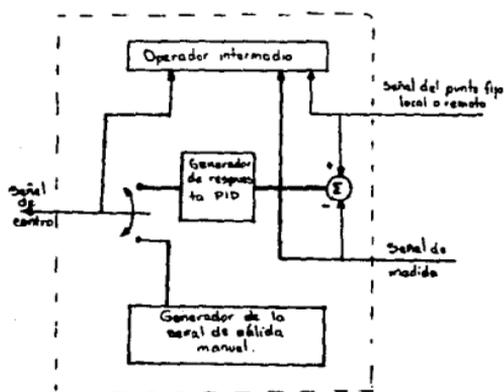


FIG.3.ELEMENTOS BASICOS DE UN CONTROLADOR RETROALIMENTADO

En lazos simples la señal de referencia puede entrar directamente por medio del operador y es llamado punto fijo "local". En esquemas complicados, esta señal puede llegar a través de otro instrumento y es definida como punto fijo "remoto". El controlador puede aceptar ambos tipos de señal, por medio de un interruptor "remoto/local" que maneja el operador. Para condiciones de arranque y emergencia, el controlador tiene incluido un control manual para generar la señal, este puede ser manejado por el operador.

Características de los lazos de control retroalimentado.

Así como todos los controladores retroalimentados tienen ciertos elementos comunes, todos los lazos de control retroalimentados parten de tres conceptos importantes:

a) Lazo abierto vs. cerrado.- La fig.2 también ilustra este concepto. Una vez que el controlador retroalimentado es instalado en un proceso y trabaja en automático se crea un lazo cerrado. La salida del controlador afecta la medida y la medida afecta la salida. Este lazo cerrado crea la posibilidad de un control por medio de una retroalimentación.

Este efecto puede ser interrumpido en una u otra dirección, entonces se dice que el lazo está abierto, y el control retroalimentado no existe por mucho tiempo. Diversas causas pueden abrir un lazo retroalimentado:

- Que el controlador esté en manual. Esto causa que la salida sea constante incluso si la medida cambia.
- Fallas del sensor o transmisor.
- Saturación del controlador, salida de 0 a 100% de la escala.
- Falla del actuador de la válvula por fricción o residuos en la misma.

b) Retroalimentación positiva vs. negativa.- Todos los controladores retroalimentados tienen medios de cambiar y controlar la acción, con una dirección definida de la respuesta del controlador a el cambio en la medida. Una acción incremento-incremento (positiva) causa que el controlador incremente la salida como respuesta a un incremento en la medida. Una acción incremento-disminución (negativa) causa que el controlador disminuya la salida cuando la medida se incrementa.

En una retroalimentación negativa, el controlador debe cambiar la salida en dirección opuesta al cambio en la medida.

c) Oscilación.- Cuando la señal medida comienza a desviarse del punto fijo, el controlador inicia el cambio en la salida. Este es un retraso que esta dentro del proceso, por ejemplo, la temperatura no responde inmediatamente y el controlador continúa cambiando la señal de salida hasta que la medida sea igual al punto fijo, sin embargo la medida seguirá cambiando por que el controlador siguió modificando la señal de salida, presentándose un ciclo.

El periodo de este ciclo puede ser medido como tiempo (usualmente en minutos) entre dos puntos análogos, como por ejemplo dos máximos. Para un buen control, el ciclo en la señal de medida deberá acercarse constantemente y llegar al punto fijo. Simultáneamente, el ciclo de salida del controlador deberá tambien, caer constantemente, hasta llegar al nuevo valor de la señal de salida. Esta oscilación representa el ensayo y error, en la búsqueda de la nueva solución al problema.

Características del proceso.

La existencia de retrasos en los procesos tiene un efecto fundamental en el funcionamiento del lazo de control retroalimentado. Básicamente los retrasos pueden ser considerados en dos categorías: Tiempo muerto y Capacidad.

* Tiempo muerto.- En general, el tiempo muerto se define como el tiempo de retraso entre el cambio en la señal de control y el comienzo de este efecto en la medida. En la fig.4 se muestra la oscilación de la señal de control a la entrada, retrasada en un intervalo de tiempo. El tiempo muerto representa un intervalo durante el cual el controlador no tiene información acerca del efecto de la acción del control. La cantidad de tiempo muerto en un proceso, afectará fuertemente el ajuste del controlador.

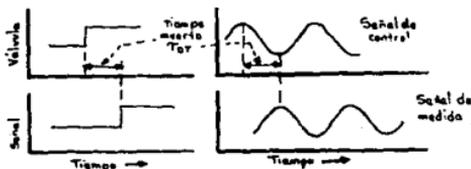


FIG.4. RETRASOS POR TIEMPO MUERTO.

Como el tiempo muerto interfiere con el buen control, se intenta reducir el retraso con los transmisores locales, especificando ampliamente los mezclados, diseñando la capacidad exacta de un tanque, y minimizando el retraso en la transmisión.

« Capacidad.- El tiempo muerto puro de proceso es raro, y virtualmente cada lazo de control lo incluye y puede dominarse por elementos de capacidad. Un elemento de capacidad, es la parte del sistema de proceso donde el material o energía pueden acumularse. La respuesta de estos elementos de capacidad difieren de los elementos de tiempo muerto en dos puntos:

- 1.- El retraso no ocurre antes que comience el cambio en la medida, es decir el tiempo muerto no es asociado con la capacidad particular de un elemento.
- 2.- La capacidad inhibe la velocidad con la cual la medida puede cambiar.

La capacidad y el tiempo muerto puros de un proceso, existen solamente en teoría. Los procesos reales incluirán un número dado de cada uno de estos elementos dinámicos.

Los tiempos muertos en serie son aditivos, 1 min. de retraso seguido de 2 min. de retraso se combinan para formar 3 min. de retraso. Sin embargo, el efecto combinado de un número de capacidades en serie no es tan obvia, la fig.5. muestra una serie de 3 capacidades que tienen un tiempo igual y constante, a lo largo con las respuestas a varios puntos, el paso de entrada aparece en el punto 1. El punto 2 muestra la respuesta de una capacidad sencilla para un paso de entrada. Los puntos 3 y 4 muestran el efecto de capacidades subsiguientes.

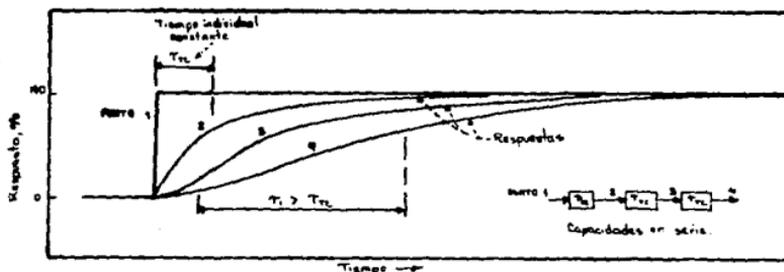


FIG.5.EFECTO DE LAS CAPACIDADES EN SERIE.

El efecto neto es la secuencia de capacidades observada por el controlador, como una combinación de un retraso por tiempo muerto, seguido de una capacidad sencilla, con un tiempo constante, este es tan grande como el tiempo constante de las capacidades individuales. De este modo, por más intrincado que sea el proceso lo podremos representar por un tiempo muerto más un modelo de capacidad.

Ganancia y fase.

Un elemento de un lazo de control retroalimentado es representado en la fig.6. Este elemento puede ser el proceso, la válvula, el transmisor o el controlador. Cada uno de estos elementos tienen una entrada y una salida.

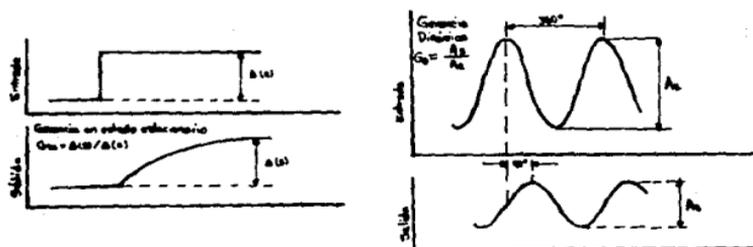


FIG.6.ELEMENTOS DINAMICOS: GANACIA Y FASE.

La ganancia, describe la cantidad de cambio en la salida que será causado por un cambio dado en la entrada. La ganancia en estado estacionario y en estado dinámico deben considerarse. Para una entrada fija, la salida del elemento comienza a cambiar y aproximarse al nuevo valor. La ganancia en estado estacionario, G_{ss} , es definida como la proporción de el cambio final en la salida a el cambio en la entrada o:

$$G_{ss} = \Delta(\text{salida}) / \Delta(\text{entrada})$$

Sin embargo, las señales que viajan alrededor del lazo de control, varían cíclicamente. La sensibilidad de un elemento a una entrada cíclica es medida por la ganancia dinámica. Cuando hay una entrada cíclica, la salida también será cíclica con el mismo periodo. La ganancia puede ser calculada como el cociente de el tamaño de la oscilación de salida, A_s , entre el tamaño de la oscilación de la entrada, A_e .

$$G_s = A_s/A_e$$

Un segundo parámetro de la respuesta de un elemento para una entrada cíclica es el ángulo de fase, el cual es ilustrado en la fig. 6 y surge porque en el lazo el máximo de la salida no coincide con el máximo de la onda de entrada, el ángulo de fase, o, de un elemento está desplazado. Un ciclo completo en cualquier señal periódica se considera compuesto de 360° , si un máximo de la salida ocurre $1/4$ después que el máximo en el ciclo de entrada, el ángulo de fase es:

$$\phi = (360) \times (-1/4) = -90^\circ$$

El signo negativo indica que el máximo de la salida ocurre después que el máximo de la entrada, y es posible que el máximo de la salida ocurra antes que el de la entrada, y es llamado ángulo precedido.

MODOS DE CONTROL RETROALIMENTADO

Un modo de control retroalimentado es una respuesta particular del controlador a un cambio en la medida o error. Las cuatro respuestas básicas son:

- Encendido-apagado (on-off)
- Proporcional.
- Integral.
- Derivativa.

Hay variaciones de estas 4 respuestas básicas, en los instrumentos de control comerciales. Algunas veces estas respuestas, son identificadas con nombres diferentes, o son cuantificadas en unidades diferentes. La respuesta derivativa podrá ser generada por diferentes formas y variando los grados de interacción, es posible tener un modo de control proporcional, integral y derivativo.

Control encendido-apagado.

Esta respuesta es la más simple de un lazo de retroalimentación. La fig.7 muestra el funcionamiento de este lazo para un proceso en el cual se calienta un líquido. Un control de este tipo solo tiene dos posiciones posibles, considerando solamente el signo del error. En el ejemplo, el controlador cierra la válvula del combustible cuando la medida sobrepasa el punto fijo (fig.7b). Por un tiempo muerto y/o retraso en el proceso, la temperatura continúa por arriba del punto fijo, antes de regresar al mismo, y disminuirá tanto que quedará por debajo del punto fijo, cuando esto sucede el controlador abre la válvula. El tiempo muerto y/o retraso en el proceso causa que la temperatura tarde en regresar al punto fijo, creando un ciclo repetitivo.

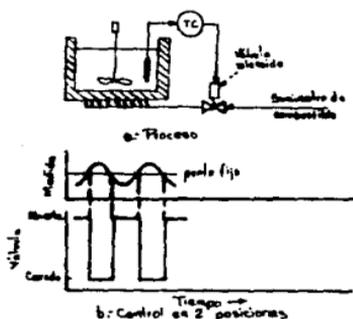


FIG.7. RESPUESTAS DE UN CONTROL ENCENDIDO-APAGADO.

Este ciclo es una respuesta normal del control encendido-apagado, pero es una seria limitación, porque no podemos solucionar el problema de control exactamente. Sin embargo, su principal ventaja es su bajo costo y su simplicidad. Esta misma función puede crearse con alarmas, contactos y relevos. El período del ciclo depende del tiempo que tarda en hacerse la medida nuevamente, después del cambio en la posición de la válvula, este período es directamente proporcional al tiempo muerto, T_m , si este se reduce a cero, la medida será instantánea. La amplitud del ciclo es inversamente proporcional al tiempo constante, T_i , del proceso.

Un control de este tipo debe aplicarse en situaciones que reúnan estas tres condiciones:

- No requerir de un control preciso.
- Tener un tiempo muerto moderado para evitar un periodo muy corto.
- Que la relación T_r/T_i sea pequeña para evitar amplitudes largas.

Control Proporcional.

Se basa en el principio de que el tamaño de la respuesta del controlador debe ser proporcional al tamaño del error. La fig.8 es una representación gráfica de la acción proporcional. Este efecto puede imaginarse como un "punto doble", que se mueve a lo largo de una línea central y en una escala de error y otra escala de la señal de salida. Un cambio en la medida o en el punto fijo, crea un cambio en el error. La escala de la señal de salida describe una acción incremento-decremento, usando la escala a la inversa podemos manejar una acción incremento-incremento.

La fig.8 ilustra conceptos importantes de la acción proporcional, el primero es la banda proporcional, PB, o ganancia G. Este parámetro ajustable define como reaccionará el controlador a un cambio en el error. La localización del punto, fija la cantidad de cambio en la señal de salida para un cambio en el error.

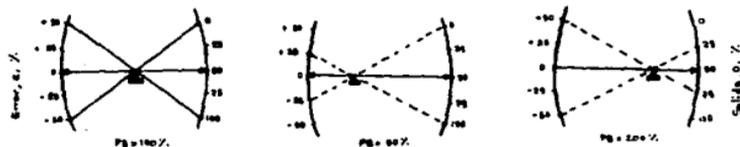


FIG.8. ACCION PROPORCIONAL

La banda proporcional, PB, es definida como el porcentaje de cambio en la medida (a un punto fijo constante) requerido para causar el 100% de cambio en la señal de salida. La ganancia, G, es definida como la relación del cambio en la salida a el cambio en el error. Estos conceptos están relacionados por: $G = 100\% / PB$.

La fig.8 también ilustra el concepto de la inclinación o tendencia proporcional. Independientemente del valor de la banda proporcional, la señal de salida será de 50% cuando el error en la entrada sea cero (medida respecto al punto fijo). Esta tendencia en la señal de salida del controlador, a un valor dado alrededor del cual varía la salida, reduce el error. Así como el error se incrementa, el cambio en la salida es del 50% de acuerdo al valor de la banda proporcional.

La fig.8 también muestra dos propiedades de la acción proporcional: es inmediata y específica.

1.- La conexión entre el error y la señal de salida, representada por el indicador, significa que el cambio en la salida ocurre simultáneamente con el cambio en el error. No ocurren retrasos en la respuesta proporcional.

2.- Cada valor del error para una banda proporcional genera un valor único en la señal de salida. El generador de respuesta proporcional es incapaz de manejar alguna otra combinación. Esta relación uno a uno entre el error y el funcionamiento del lazo cerrado de control proporcional, se describe brevemente a continuación:

La fig.9 muestra otra representación gráfica de la acción proporcional: cada valor de la banda proporcional define una relación específica entre el error, e, y la salida, O, la cual puede ser expresada como: $O = e(100) / PB + 50\%$ donde O es la señal de salida, %, e es el error, %, y PB es la banda proporcional, %.

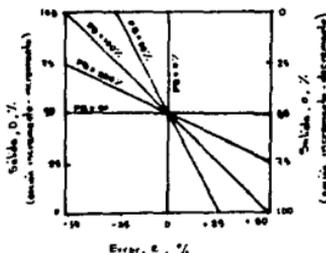


FIG.9.RELACIONES ENTRE EL ERROR Y LA SEÑAL DE SALIDA PARA VARIAS BANDAS PROPORCIONALES.

Por ejemplo, suponiendo que el punto fijo es de 60% de la escala, la medida es de 40% en la escala, y que la banda proporcional es igual al 50%, entonces, para una acción incremento-decremento: $O_{20} = (60 - 40)(100/50) + 50 = 90\%$ aquí O_{20} es la señal de salida para una acción incremento-decremento.

Para una acción incremento-incremento, realizamos el cálculo del error a la inversa, y tenemos:

$$O_{21} = (40 - 60)(100/50) + 50 = 10\%$$

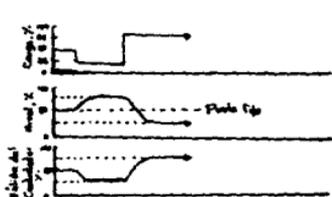
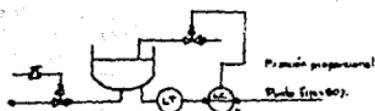
La línea recta que relaciona el error y la salida, para un controlador proporcional, se identifica como una línea o un dispositivo de ganancia constante. En esta representación, el carácter específico de la acción proporcional, significa que la coordinación del error y la salida debe identificar un punto de "caída" en la línea dada de la banda proporcional, y el punto de operación para el controlador que solamente se mueve a lo largo de la línea.

Conforme la banda proporcional disminuye, la acción proporcional se concentra dentro de una banda estrecha, alrededor del punto fijo. Desde el punto de vista de la ganancia, el mismo cambio en el error causa grandes cambios en la salida. En el límite, la banda proporcional es igual a cero (la ganancia es infinita) y el menor error causará que la señal de salida este en el extremo contrario de la escala. Entonces un control encendido-apagado es el caso límite de un control proporcional. En el otro extremo, cuando la banda proporcional es igual a infinito (la ganancia es igual a cero), el controlador simplemente no responde a un cambio en el error.

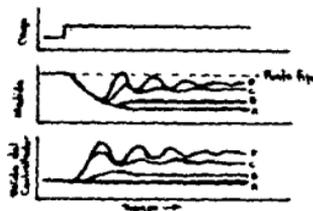
El control de nivel de un proceso se muestra en la fig. 10a, donde el flujo de salida es la carga del proceso. Para un control de nivel, el controlador debe balancear el flujo de salida manipulando el flujo de entrada; esto requiere una acción incremento-decremento. Antes flujos varían desde 0 hasta 100%, el punto fijo del controlador es 50% y la banda proporcional igual a 100%.

Como punto de partida, suponemos que la carga es igual a 50% y que el nivel es el punto fijo. Cuando la salida del controlador sea de 50% el flujo de entrada será igual al flujo de salida, y el nivel remanente será constante.

Ahora, suponemos un trastorno, de modo que la carga disminuye un 25%, es decir, el flujo de salida se reduce. ¿Cómo será la respuesta del lazo a este trastorno?



a.- Variación con la carga.



b.- Efecto de la banda proporcional

FIG. 10. CONTROL DE NIVEL BAJO ACCIÓN PROPORCIONAL.

Puesto que el flujo de salida es menor que el flujo de entrada, inicialmente, el nivel comenzará a aumentar, y el error empezará a ser negativo. Tomando como referencia la línea de 100% de PB en la fig. 9, podemos ver que la salida del controlador (para una acción incremento-decremento), simultáneamente comienza a decrecer, así como el punto de operación se mueve hacia la esquina superior izquierda de la carta. Esta acción restringe gradualmente el flujo de entrada hasta que es igual a 25% cuando el nivel sube hasta el 75% (fig. 10a). Entonces el flujo de entrada es igual al flujo de salida, y el nivel remanente es constante.

El controlador no puede retornar la medida al punto fijo. Cuando la banda proporcional es igual al 100%, la salida es igual a 25%, pero solamente cuando el error es de - 25%. Por lo tanto, se requiere una desviación del estado estacionario para balancear la carga en el proceso. En la misma manera, si la carga se incrementa a 75%, el nivel cae hasta el 25% antes del punto fijo, donde la salida del controlador es del 75% y además balancea la carga en el proceso.

Esta desviación del estado estacionario del punto fijo es llamado "compensación" y surge porque la inclinación o tendencia de B (la salida cuando la medida es igual al punto fijo), es fija. Si las condiciones de carga en la salida difieren de la tendencia, deberá presentarse algún error del estado estacionario. Cada variación en la carga requerirá una salida diferente y una compensación diferente. La cantidad de compensación, e_0 , es una función de la salida requerida y la banda proporcional, de acuerdo a la siguiente ecuación que describe un controlador proporcional:

$$D = e(100/PB) + B$$

$$e_0 = (PB/100)(D - B)$$

De esta manera, el propósito de una tendencia ajustable tiene un porque. Cambiando la tendencia en la respuesta proporcional igual a la salida requerida, la medida puede retornar al punto fijo. Este ajuste es frecuentemente llamado "reajuste manual".

La fig.10b muestra el efecto, en el cual la banda proporcional se hace estrecha, en la respuesta de un lazo cerrado para un trastorno en la carga:

* Caso A.- El controlador no responde. La medición cae a un nuevo valor de estado estacionario.

* Caso B.- La respuesta proporcional es demasiado débil, produciendo una compensación excesiva.

* Caso C.- La banda proporcional es correcta. La respuesta del controlador es suficientemente fuerte para causar un amortiguamiento de 1/4 de onda.

* Caso D.- La banda proporcional es muy estrecha. La sobre reacción causa oscilaciones excesivas en la medida.

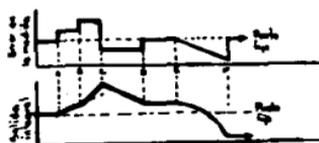
Si la banda proporcional es muy reducida, la ganancia en el controlador empezará a subir, lo suficiente para hacer la ganancia del lazo cerrado mayor a 1. En lugar de decaer, el ciclo para la medida y el de la salida del controlador, crecerán hasta alcanzar el ciclo de la válvula entre sus límites, como un control encendido-apagado.

Para muchos procesos bajo un control proporcional, una banda proporcional particular (es decir, una ganancia) crea la respuesta deseada de lazo cerrado. El valor exacto dependerá de los otros elementos del lazo cerrado, ya que cada uno tiene ganancias individuales. En general, cuando la ganancia de un proceso es baja por una relación T_p/T_c pequeña, la PB requerida también será baja y una vez ajustada, la compensación variará con la carga del proceso.

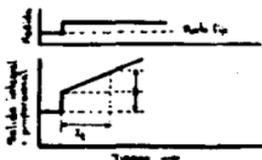
Un control proporcional es una mejora sobre el control encendido apagado, porque estabiliza el lazo, su desventaja es la compensación. Cuando las cargas son moderadamente constantes y la banda proporcional requerida estrecha, la compensación no será un problema. El punto fijo puede ajustarse hasta la medida del valor deseado; y el punto fijo entonces, no será mayor al valor deseado de la medida, solo será una simple referencia para la acción proporcional.

Control Integral.

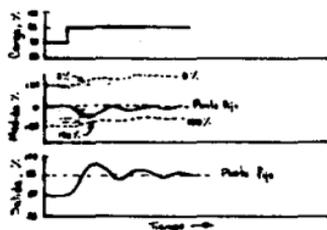
La acción integral puede combinarse con la acción proporcional para eliminar la compensación, donde esta es inaceptable. Semejante a la acción proporcional, la acción integral también responde a el error, sin embargo, la acción integral se basa en el principio, de que la respuesta debe ser proporcional al tamaño y a la duración del error.



a. Tiempo y duración del error



b. Tiempo integral para determinar la velocidad de respuesta



c. Eliminación de la compensación.

FIG.11. RESPUESTAS DEL CONTROL BAJO ACCIÓN INTEGRAL.

La respuesta de lazo abierto en la fig.11a, muestra como la acción integral se relaciona con el error. Inicialmente, mientras el error es igual a cero, la señal de salida remanente es constante a un valor que depende de la "historia" del error. Los errores en la medida producen:

* Punto A.- Aparece un error constante. La respuesta integral conduce la señal de salida a una velocidad constante, proporcional a el tamaño del error, y tan grande como el error remanente constante.

* Punto B.- El tamaño del error se incrementa. La respuesta integral conduce la señal de salida a una velocidad mayor.

* Punto C.- El signo del error cambia. La respuesta integral lleva a la señal de salida en la dirección opuesta.

* Punto D.- El error retorna a cero. La acción integral se detiene al valor existente de la salida.

* Punto E.- El error se incrementa a una velocidad constante. La respuesta integral conduce la señal de salida a un velocidad que se incrementa constantemente.

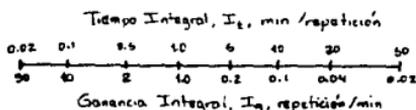
* Punto F.- El error retorna a cero. La acción integral se suspende en el valor de la salida.

Estas respuestas ilustran las propiedades más importantes de la acción integral. Mientras que la acción proporcional relaciona la señal de salida a la medida a través del error, la acción integral busca un valor de la señal de salida, deteniéndose, cuando el error es cero. Esta es la propiedad que permite que la acción integral elimine la compensación. La acción integral es satisfactoria, solo cuando la medida retorna al punto fijo. No importa cuan largo sea el error, la acción integral conducirá la señal de salida en dirección tal que reduzca el error.

La respuesta de lazo abierto en la fig.11b, muestra como las acciones proporcional e integral se combinan en un controlador. Inicialmente, la señal de salida es constante porque el error es cero. Cuando la medida cambia aparece el error, simultáneamente ocurre un cambio en la señal de salida por la acción proporcional (ver fig.8). El tamaño de esta respuesta depende de la banda proporcional. Al mismo tiempo, la acción integral comienza a conducir la señal de salida, como se muestra en la fig.11a.

Para un error constante, el ajuste de la acción integral cambia la velocidad a la cual conduce la señal de salida; esta velocidad es cuantificada en términos del tiempo requerido para el cambio en la salida (debido a la acción integral) para igualar o repetir la respuesta causada por la acción proporcional.

Algunos instrumentos comerciales usan unidades dimensionales de minutos/repetición, referido como un tiempo integral. Otros usan unidades de repetición/minuto, referido como ganancia integral, cada uno es simplemente el inverso del otro, como se muestra en la carta:



Aumentando el tiempo integral, o disminuyendo la ganancia integral, reducimos la fuerza de la acción integral. La combinación de la acción proporcional más la integral puede expresarse por la ecuación:

$$0 = \left(\frac{100}{\%}\right) e_s + \left(\frac{100}{\%}\right) \left(\frac{1}{I_2}\right) \int e_s dt$$

Cuando comparamos esta ecuación, con la que describe un controlador solo proporcional, la única diferencia es el último término. Cuando el control proporcional es limitado por una tendencia fija, la acción integral (ecuación anterior) usa la integral del error para ajustar la tendencia, deteniéndose cuando el error es igual a cero.

La fig. 11c es una representación de cómo la acción integral elimina la compensación, provocada por un trastorno en la carga. Inicialmente, el 50% de carga, un 50% de salida mantiene la medida en el punto fijo. En el estado estacionario, este es también el valor de la tendencia variable, entonces el error es igual a cero. El controlador tiene una banda proporcional de 40%, el 50% de la tendencia indica que hay una variación del 40% en la medida sobre la cual la acción proporcional ocurrirá, centrada alrededor del punto fijo. Cuando la medida comienza a fallar, por un incremento en la carga, las acciones proporcional e integral regresarán la medida al punto fijo.

La contribución de la acción integral es para incrementar el término de la tendencia, como una función del error. Cuando la respuesta es completa, el término de la tendencia se incrementa al 75%, y el término proporcional retorna a cero. El 75% de la tendencia significa que la banda proporcional será desviada de manera que el rango de la acción proporcional se extenderá desde 10% abajo del punto fijo hasta 30% arriba del punto fijo (de esta forma, la acción integral ejecuta continuamente la función reestablecer).

La habilidad de la acción integral para eliminar la compensación es una gran ventaja, y además la acción integral es siempre especificada para un control retroalimentado. Sin embargo, esta acción tiene una desventaja importante: al crear una respuesta gradual, aparece un retraso en el controlador, semejante al retraso provocado por una capacidad. Esto causa un retraso de fase a través del controlador y largos periodos de oscilación del lazo, como una función de la contribución relativa de las acciones proporcional e integral.

Típicamente, el periodo de oscilación para un lazo, bajo un controlador ajustado en acción proporcional más integral, será 50% más largo que si el controlador es sólo proporcional. Para un lazo relativamente rápido, tal como el control de flujo, esto no es importante. Sin embargo, para lazos lentos, la extensión del periodo puede ser una limitación seria. Para lazos donde el valor exacto de la medida no es crítica (como en un control de nivel), el periodo corto de un controlador solo proporcional puede ser una ventaja.

La acción proporcional, similar a la acción integral, incrementa la ganancia del controlador. En general, el tiempo integral debe ser proporcional a la rapidez de respuesta del proceso, a la acción del control. Si el tiempo es muy corto, este conducirá al operador final al límite, antes que la medida responda, sobrepasará el punto fijo, causando que la acción integral conduzca la señal al límite opuesto.

Aplicaciones en las cuales los errores sostenidos son característica del proceso (procesos batch o que tienen cambios en el punto fijo) pueden usar un control integral. Aunque el tiempo integral puede ser correcto para un control normal, en tales situaciones, la señal de salida puede saturarse durante el error sostenido, y provocar un sobrepaso cuando la medida finalmente se acerque al punto fijo.

En estas aplicaciones puede adicionarse un interruptor al circuito integral del controlador (si es electrónico o neumático). Este interruptor es conocido como un "interruptor batch" porque el problema de la acción final es primariamente asociado con procesos discontinuos o batch. Los controladores más recientes y el control algorítmico son diseñados para evitar la saturación integral o problema de acción final.

Control Derivativo

Las acciones proporcional e integral tienen una seria limitación: Un error significativo puede presentarse antes de que estos modos de control generen una respuesta fuerte.

La acción derivativa se basa en el principio de que el controlador debe también responder a la misma velocidad a la cual la medida cambia, aún cuando el error actual sea todavía pequeño.

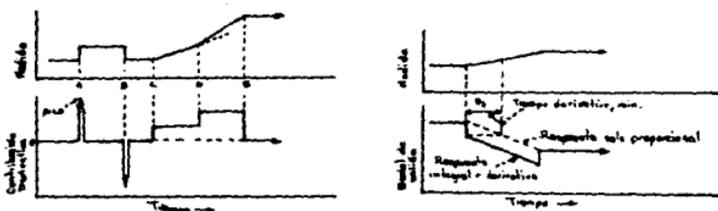


FIG. 12. RESPUESTAS DE LA ACCIÓN DERIVATIVA.

La respuesta de lazo abierto en la fig. 12a muestra como la respuesta derivativa relaciona la medida. La velocidad de cambio puede ser calculada como una cantidad de cambio dividida por el tiempo sobre el cual el cambio tuvo lugar. Por ejemplo, en la fig. 12a.

* Punto A.- Aparece un cambio. Como el cambio sucede en el tiempo cero, su velocidad es infinita, y la acción derivativa responde con un pico en la señal de salida. La dirección de la respuesta será determinada por la acción del controlador. La fig. 12a muestra la respuesta para una acción incremento-incremento. Después del cambio se establece la medida, y la contribución derivativa retorna inmediatamente a cero.

* Punto B.- Aparece un segundo cambio, pero ahora negativo. La contribución derivativa a la respuesta es un pico negativo.

* Punto C.- La medida comienza a incrementarse a una velocidad constante. La respuesta derivativa es constante, con una contribución positiva que es proporcional a la velocidad de cambio.

* Punto D.- La velocidad de cambio en la medida sufre un incremento. La contribución derivativa se incrementa proporcionalmente.

* Punto E.- El cambio en la medida se detiene. La contribución derivativa retorna a cero.

La respuesta derivativa no se relaciona al valor absoluto de la medida. Cuando el cambio en la medida se detiene, la contribución derivativa retorna a cero, y cuando la medida comienza a cambiar, la acción derivativa genera una respuesta inmediata y proporcional a la velocidad de cambio.

Así como la medida continúa cambiando, la señal de salida también, debido a la acción proporcional.

La respuesta proporcional tiene la ventaja en tiempo. El tamaño de esta ventaja es el tiempo derivativo, D , min. La acción derivativa es algunas veces erróneamente referida como "acción anticipada". (NOTA: El controlador solo puede responder al error real, y no puede anticiparse a la llegada de un error). Incorporando el tiempo derivativo generamos una respuesta derivativa larga que aparece como una gran diferencia de tiempo entre las dos respuestas en la Fig. 12b.

Seguimos las teorías para acción proporcional e integral, cada controlador aplica una acción derivativa al error. Sin embargo, esto pasa que en la respuesta de acción derivativa, cambian la medida y el punto fijo.

Actualmente casi todos los controladores son diseñados de manera que la respuesta derivativa del generador parezca que es la señal medida. Inicialmente, las acciones proporcional y derivativa responden al cambio en el punto fijo. Cuando la acción derivativa es combinada con las acciones proporcional e integral, la respuesta total está dada por:

$$D = \frac{100}{T_D} \left\{ e_0 + \frac{1}{T_I} \int e_0 dt - D \left(\frac{de}{dt} \right) \right\}$$

donde e , es una variable controlada, y representa la señal medida.

La ecuación anterior describe un controlador ideal. La mayoría de los controladores con los tres modos de control, presentan alguna interacción entre ellos, de manera que un cambio en cualquiera de ellos, tiene efecto en toda la respuesta.

Incorporando la acción derivativa puede mejorar significativamente el control de un proceso que tiene retrasos largos. La acción derivativa es opuesta a la acción integral, para generar la respuesta derivativa, al inverso dinámico del retraso se construye dentro del controlador. Aunque la acción derivativa también incrementa la ganancia del controlador, tiene características que pueden cancelar un atraso en el lazo de control, y por lo tanto acortar el período de oscilación. Esto puede más que cancelar el incremento en el período causado por la acción integral, frecuentemente hasta la compensación es eliminada.

La principal desventaja de la acción derivativa es la sensibilidad al ruido por su reacción a la velocidad de cambio de respuesta. Al menosamente demasado ruido de excitación baja, causará grandes variaciones en la salida del controlador.

AJUSTE DE LOS CONTROLADORES DE PROCESO.

Una revisión de los principios básicos y procedimientos de ajuste del controlador capacitará al ingeniero para ajustar una variedad de lazos de control, y conseguir la estabilidad de los mismos.

El ajuste de un controlador es realizado por una medición segura de las características del lazo de control. Las técnicas para esta medición inicial son críticas, porque son la base para la subsecuente colocación del controlador.

Una guía generalizada de ajuste, para determinar la colocación del controlador requiere del uso de un modelo, usualmente elegido (representativo de muchos procesos y sus sistemas de control) de algunos lazos de primer orden con tiempo muerto.

Los modos de control, se considera que son los más frecuentemente encontrados y las combinaciones de las acciones proporcional, integral y derivativo. Su discusión se enfocará en los procedimientos para determinar la colocación final para cada modo, basándose en las características fundamentales del control de proceso, como capacidad, tiempo muerto y período natural.

Para determinar la colocación del controlador, hay dos métodos: 1) Paso de respuesta, en lazo abierto, y 2) Ciclo de lazo cerrado.

Método de lazo abierto.

Para determinar la capacidad y el tiempo muerto via respuesta de lazo abierto (también conocido como método de reacción), se planea un registro haciendo que una carta de velocidad rápida (por ejemplo: 3/4 in/min) sea conectada a la señal de medida. La prueba es entonces ejecutada como sigue:

1.- Poniendo el registrador en el modo de velocidad alta, con el controlador en posición manual y la línea de medida en la salida a un valor constante.

2.- Hacer como primer paso que la salida del controlador tenga un valor fijo como de 5 a 10 %, y lo mismo para el tiempo, poner una marca en la carta del registrador para poder determinar el tiempo muerto.

3.- Quitar la carta para registrar, cuando la medida alcance el valor final.

Una respuesta típica para un proceso que tiene un tiempo muerto y un lazo de primer orden se muestra en la fig.13. El tiempo transcurrido desde el punto donde el paso cambia hasta que la medida comienza a subir es el tiempo muerto. Puede ser calculado por la medición de la distancia (in) en la carta y dividiendo por la velocidad de la carta (in/m.n).

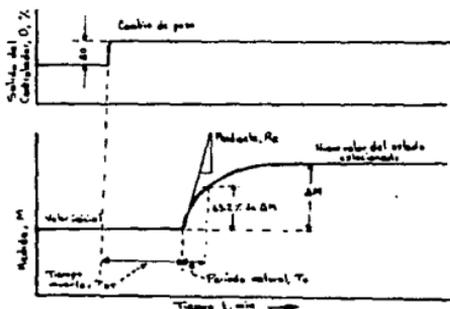


FIG.13. RESPUESTA TÍPICA DE LAZO ABIERTO DE UN PROCESO CON TIEMPO MUERTO Y RETRASO.

La medida sube a un valor final que es el nuevo estado estacionario, que resulta del cambio en el paso hecho, en la salida del controlador. De esta curva, el tiempo constante, el tiempo muerto y la velocidad de respuesta del proceso pendiente del lazo pueden ser medidos.

Las unidades de medida para el cálculo de la pendiente son las del ajuste del controlador, usualmente expresadas como por ciento o tiempo. La pendiente de la curva de respuesta deberá ser en unidades de por ciento / tiempo y es expresada como: $R_a = (\Delta M/t)/\Delta O$, donde R_a es la velocidad de respuesta, 1/min; ΔM es el cambio en la medida, %; t es el tiempo, min; y ΔO es el cambio en la salida, %.

Ciclo de lazo cerrado.

El método de ciclo de lazo cerrado es popular porque solamente se mide un parámetro. Es una desventaja en las líneas de proceso que no permiten el ciclo de lazo cerrado, incluso en un periodo de tiempo corto, por causa de un ciclo de lazo cerrado con una amplitud constante y un periodo natural, T_n , que puede ser determinado. Un ejemplo de esta medida se muestra en la fig.14.

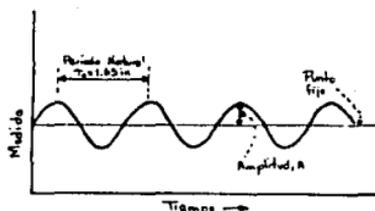


FIG.14. CICLO DE AMPLITUD CONSTANTE CARACTERÍSTICO DE UN LAZO CERRADO.

Para inducir un ciclo con amplitud constante en un lazo de control cerrado, es necesario:

- * Paso 1.- Asegurar que el lazo está en condiciones estables.
- * Paso 2.- Ajustar los modos integral (I) y/o derivativo (D) a acción mínima en el controlador.
- * Paso 3.- Hacer un paso de cambio en el punto fijo del controlador y observar el resultado midiendo el ciclo.
- * Paso 4.- Reducir la banda proporcional, además reducir la medida del ciclo hasta el valor del estado estacionario, siguiendo esto, hacer otro paso de cambio en el punto fijo del controlador.
- * Paso 5.- Continuar repitiendo el paso 3 y 4 hasta que el ciclo medido sea constante en su amplitud y período como se muestra en la fig.14. También debe asegurarse que el actuador final no oscile entre estos límites, porque la oscilación puede llevar a resultados erróneos.
- * Paso 6.- Medir la distancia de máximo a máximo, para la medida de salida del registrador, convirtiendo esta medida a tiempo, dividiendo entre la velocidad de la carta en el registrador.

Errores en la medida.

La carta registradora puede ser usada para seguir la trayectoria de las respuestas de la variable medida, para los correspondientes cambios en la salida del controlador. Después la colocación del controlador se basa en las medidas del elemento registrador, algunos errores al registrar y medir pasan directamente a la colocación. Los ajustes del controlador frecuentemente tienen una resolución no menor que 15% del valor indicado.

Objetivos del ajuste.

Tras medir el periodo natural y/o el tiempo muerto y el tiempo constante de capacidad, se puede determinar el ajuste del controlador, usando las relaciones desarrolladas por: (1) Ziegler y Nichols, (2) Cohen y Coon, (3) Smitskey, y otros. El objetivo de estos investigadores es determinar el ajuste que minimiza el error integrado sobre el tiempo.

Los métodos para derivar tales relaciones son altamente analíticos y por lo tanto difíciles de usar. En general, la respuesta que resulta de un controlador óptimamente ajustado, será tal que de 1/4 de amplitud de amortiguamiento (QAD). La fig.15a es característica de QAD, este tipo de respuesta se correlaciona, en la práctica, con la respuesta de mínimo error.

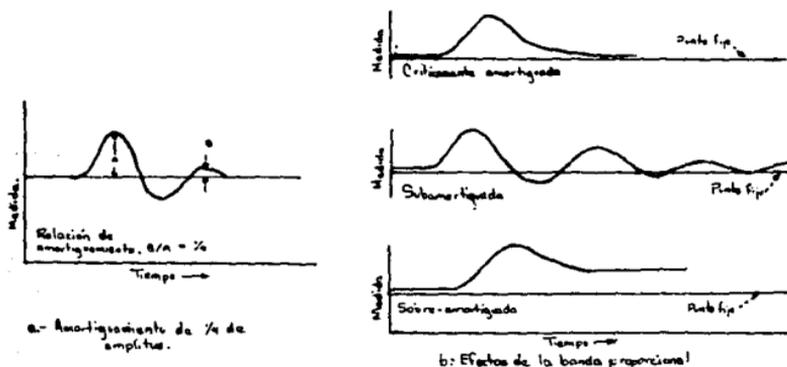


FIG.15.COMO ESTABILIZAR UN LAZO RAPIDAMENTE DEPENDIENDO DE LA BANDA PROPORCIONAL.

Algunos procesos no pueden tolerar la oscilación alrededor del valor final, y se debe elegir otro tipo de respuesta. Un ejemplo de la curva de respuesta para un controlador solamente proporcional, aproximándose al valor final se muestra en la curva de la fig.15b, y es llamada respuesta "críticamente amortiguada". Una respuesta críticamente amortiguada de un controlador producirá un error total, tan grande como QAD, pero puede ser aceptable, dependiendo de los requerimientos particulares del proceso.

Si la ganancia del controlador además se incrementa, el ciclo se prolongará, en caso de un trastorno. Este tipo de respuesta es llamado como "sub-amortiguada" y resulta en una pequeña desviación del punto fijo (ver curva en la Fig. 15b). Si la ganancia es reducida, la respuesta al trastorno deberá reducirse, resultando una desviación grande del punto fijo, y la respuesta se conoce como "sobre-amortiguada".

Es recomendable usar las relaciones de Ziegler y Nichols antes de usar las de Cohen y Coon, a menos que la relación τ_w/τ_i , sea mayor que 0.1. Los análisis de selección de ajuste son necesarios para compensar el error en la medida y el ajuste. En este aspecto, los procedimientos pueden ser considerados como una aproximación iterativa.

Modo solo proporcional.

El controlador solamente proporcional encuentra aplicación en procesos que requieren una respuesta rápida y que por algún tiempo puedan tolerar una desviación constante del punto fijo. La cantidad de esta desviación es función de la banda proporcional y la tendencia.

El controlador solamente proporcional tiene un ajuste y QAD es un criterio aceptable. Las recomendaciones para el ajuste son:

Método: Ziegler y Nichols, y Shinskey

+ Lazo cerrado: $PB = 2(PB)'$ donde $(PB)'$ es el ajuste de la banda proporcional que produce un ciclo de amplitud constante

+ Lazo abierto: $100/PB = 1/(\tau_{or}, R_k)$

Método: Cohen y Coon:

$$100/PB = (1 + \frac{\mu}{3}) / (\tau_{or}, R_k) \quad \text{donde } \mu = \tau_{or} / \tau_i$$

Si QAD no es deseada, un incremento en la banda proporcional, resultará en un amortiguamiento crítico; un incremento adicional producirá una respuesta sobre-amortiguada. Una disminución en la banda proporcional de el amortiguamiento QAD creará una respuesta sub-amortiguada.

Modo proporcional más integral.

El controlador proporcional más integral (PI) es probable encontrarlo en casi todos. Sus ventajas son su rápida respuesta y su desviación cero para el punto fijo en estado estacionario. El procedimiento de ajuste para un controlador PI es algo más difícil de evaluar, porque existen dos ajustes, y muchas combinaciones de estos producirán un OAD. Por lo tanto, son necesarios otros criterios para evaluar el amortiguamiento del controlador.

Shinskey muestra que el periodo de amortiguado, ajustado por un controlador PI, será aproximadamente 1. Para un proceso en que el periodo natural, T_0 , es difícil de determinar, el valor para T_1 y T_{0T} , puede ser determinados por el método de lazo-abierto; y la frecuencia natural aproximada de la fig.16.

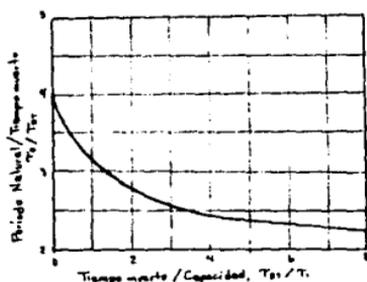


FIG.16. PERIODO NATURAL APROXIMADO.

Las recomendaciones para el amortiguamiento basadas en la medida de T_0 , o T_1 , o ambos son:

Método: Ziegler y Nichols

+ Lazo cerrado: $PB = 2(PB)^*$, $I = T_0/1.2$ donde I es el tiempo de reajuste, min.

+ Lazo abierto: $100/PB = 0.9 / (T_{0T} R_n)$, $I = 3.33 T_0$.

Método: Cohen y Coon

$100/PB = (1 + \frac{R_n}{T_0}) / (T_{0T} R_n)$, $I = 3.33 T_{0T} (1 + \frac{R_n}{T_0}) / (1 + \frac{R_n}{2 T_0})$

Método: Shinskey

$$PB = 2 (FB)' \quad I = 0.43 T_c$$

Modo proporcional, integral y derivativo.

Los controladores de tres modos (PID) no pueden ser usados en mediciones interferidas, porque la contribución derivativa se basa en la medición de la velocidad de cambio.

El controlador PID se usa en procesos, que son de respuesta lenta y tienen periodos largos. Una aplicación común es en el control de temperatura, donde la velocidad de calentamiento puede cambiarse rápidamente, mientras que la medida de la temperatura comienza a cambiar. La acción derivativa acorta el periodo de respuesta a un trastorno.

Debido a la construcción física de la mayor parte de los controladores, ocurre una interacción entre los modos integral y derivativo. Esta interacción causa el valor efectivo del modo hasta diferir de sus valores fijos. El tiempo efectivo, $I_{(ef)}$, es la suma de dos constantes de tiempo:

$$I_{(ef)} = I_t + D_t$$

El tiempo efectivo derivativo, $D_{(ef)}$, es: $D_{(ef)} = \frac{1}{\frac{1}{I_t} + \frac{1}{D_t}}$

Dos puntos importantes concernientes a las ecuaciones anteriores son:

1.- El valor efectivo para el tiempo derivativo nunca puede ser más grande que 1/4 del tiempo integral efectivo, que ocurre cuando $D_t = I_t$.

2.- Cuando D_t es mayor que I_t , la contribución en cada acción de control es inversa. En otras palabras, cuando el ajuste de D_t sea tan grande como I_t , este cambia de valor para I_t más que para $D_{(ef)}$.

El criterio de funcionamiento para un controlador PID puede ser evaluado por la medición del periodo de amortiguamiento. El ajuste óptimo generalmente resulta con un periodo QAD que es aproximadamente igual al periodo natural. El periodo de amortiguamiento será referido a $T_{1/4}$ y es igual que T_c .

Recomendaciones para el ajuste de respuesta:

Método: Ziegler y Nicols

$$+ \text{Lazo abierto: } 100/PB = 1.2 / (T_0, R_R), \quad I = 2 T_{cr}, \\ D = 0.5 T_{cr}$$

$$+ \text{Lazo cerrado: } PB = 1.66 (PB)', \quad I = 0.5 T_0, \quad D = T_0 / 8$$

Método Cohen y Coon

$$100/PB = 1.35 \left[(1 + \frac{L}{T_0}) / (T_{cr} R_R) \right], \quad I = 2.5 T_{cr} \left[(1 + \frac{L}{T_0}) / (1 + \frac{L}{T_0}) \right] \\ D = 0.37 T_{cr} / (1 + \frac{L}{T_0})$$

Método: Shinskey

$$PB = 4 (PB)', \quad I = 0.5 T_0, \quad D = 0.12 T_0$$

MÉTODOS RETROALIMENTADOS PARA CONTROL DE SISTEMAS

El control retroalimentado puede implementarse por diferentes técnicas. Hemos visto que un cambio en el valor de entrada básica al controlador para un proceso que tiene características lineales. A continuación presentamos técnicas avanzadas de control retroalimentado, donde la señal de entrada al controlador puede derivarse desde un dato simple, relación de control o de las características no lineales del proceso. La descripción de cada una de las técnicas nos indicará su aplicación.

- Datos simples.- El proceso es dominado por un tiempo muerto; o una variable de control es medida por un dispositivo que suministra una señal de salida intermitente al sistema de control, por ejemplo un proceso de cromatografía.

- Relación.- El proceso que se quiere controlar es afectado por la relación entre una variable (como mínimo) y una de las otras variables. La segunda variable puede controlarse por separado.

- No lineal.- El proceso tiene características no lineales, tales que la ganancia del proceso puede cambiar significativamente, como una función de la carga o el punto fijo. El control de pH en los procesos exhibe tales características.

Control con datos simples.

El efecto de usar una medida simple provoca un intervalo de tiempo, t , para introducir un elemento de tiempo muerto dentro del lazo de control; sabemos que los elementos múltiples de tiempo muerto son aditivos. Desde el punto de vista del comportamiento de lazo cerrado, un observador no podría discernir las características individuales de cada elemento de tiempo muerto, solo se ve el efecto en conjunto. Un proceso típico que tiene tiempo muerto y capacidad, oscilará de acuerdo a:

$$\begin{aligned} T_o &= 4 \cdot T_{DT} \\ T_{DT} &= \sum_{i=1}^n (T_{DT})_i \\ T_{DT} &= (T_{DT})_p + \Delta t \\ T_o &= 4[(T_{DT})_p + \Delta t] \end{aligned}$$

donde T_o es el periodo natural, min; T_{DT} es el tiempo muerto, min; $(T_{DT})_p$ es el tiempo muerto del proceso, min; y Δt es el intervalo simple para la medición retroalimentada, min.

Cuando un proceso tiene un tiempo muerto muy pequeño: $(T_{DT})_p \ll \Delta t$, tenemos que: $T_o \approx 4 \Delta t$. Este caso no indica que el periodo natural de oscilación es dominado por el tiempo muerto simple de una medición retroalimentada.

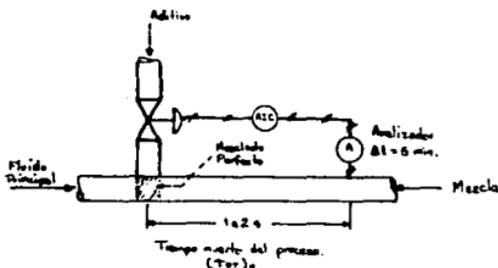


FIG. 17. LINEA DE PROCESO BAJO LAZO DE CONTROL CERRADO.

Una línea de proceso combinada se muestra en la fig.17, aquí un aditivo se mezcla con el fluido puro en una tubería. El control continuo se ejecuta usando una medida discontinua. El analizador tiene un tiempo simple de 5 min ($\Delta t = 5$) y es conectado a un controlador solo proporcional. Para este ejemplo, suponemos que el tiempo constante capacitivo es cero, y que entoces ($T_m \ll \Delta t$, $(\Delta m) = 0$, y el lazo oscilará de acuerdo a :

$$T_o = 2 T_p \approx 2 \Delta t$$

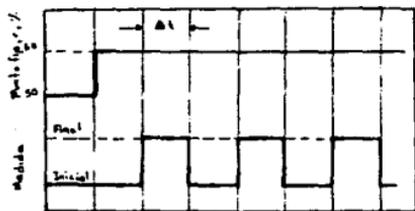
Este proceso es dominado por el intervalo simple del analizador. La fig.18 ilustra el comportamiento de este lazo con bandas proporcionales de 100, 200 y 400 % para un cambio en el punto fijo. Por ejemplo, si el punto fijo cambia el 10% (es decir, se incrementa desde 50 a 60 %) el proceso tiene una banda proporcional de 100% (fig.18a) y deberá tener una ganancia del lazo de 1 y nunca ajustará la salida. Con el controlador fijo a 200 ó 400 % de PB (fig.18b y 18c), el lazo del controlador deberá ser estable, pero la medición no podrá ajustar la salida en 55% y 52.5% respectivamente.

Idealmente, la medida debe acercarse al punto fijo en un período simple (Δt). Y tenemos que la medida no es igual al punto fijo, cuando usamos un control solo proporcional (excepto para una condición de carga donde la tendencia este en manual y se esta tomando la medida igual al punto fijo). La adición de la acción integral es necesaria para quitar la compensación.

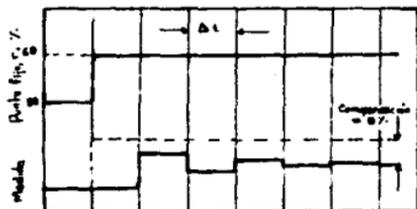
La fig.19, ilustra el comportamiento de un control integral en el proceso de la fig.17 para un cambio en el punto fijo por una diferencia, el controlador integral fija como relacionar el tiempo simple (recordar que un tiempo muerto puro de proceso bajo control integral oscilará como $T_o = 4 T_m$).

Cuando $I = \Delta t$, la respuesta ideal se logra al adicionar un control proporcional. Sin embargo, las características dinámicas del proceso mostrado en la fig.17, son idealizadas por la eliminación de la capacidad y el tiempo muerto real del proceso. Para un proceso que exhiba las características supuestas, el mejor control será el integral, donde $I = \Delta t$.

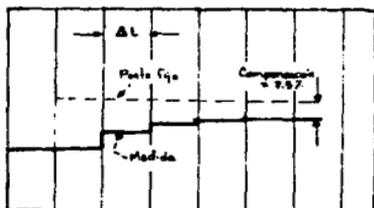
Las respuestas en estos ejemplos son producidas por un disturbio en el punto fijo, pero pueden ser consecuencia de un transtorno positivo en la carga (aumento), el resultado debe ser el mismo. Un transtorno negativo en la carga (disminución) causará una compensación al otro lado del punto fijo.



Intervalo de prueba, Δt , min
a- Banda Proporcional = 100%

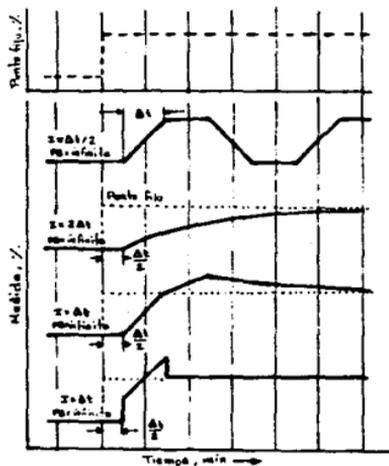
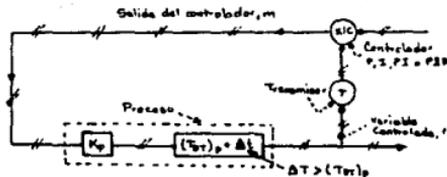


Intervalo de prueba, Δt , min
b- Banda Proporcional = 200%



Intervalo de prueba, Δt , min
c- Banda Proporcional = 400%

FIG. 18. RESPUESTA PARA EL UN CAMBIO EN EL PUNTO FIJO



Los valores en el diagrama están sujetos a: $T_i = 0$; Ganancia en el estado estacionario, $M_p = 1$; Tiempo muerto del proceso, $(T_{sp})_p = \Delta t / 2$; Tiempo integral, I . Banda proporcional, P_0 , y el intervalo de prueba, Δt , como se muestran en el diagrama.

FIG. 20. RESPUESTA PARA UN CONTROL RETROALIMENTADO.

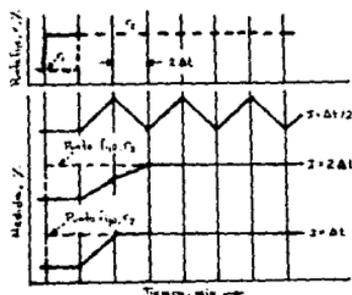


FIG.19. RESPUESTA DEL CONTROL BAJO ACCIÓN INTEGRAL.

Un ejemplo generalizado de control retroalimentado, para un proceso similar al de la fig.17 se muestra en la fig. 20a. Aquí la ganancia en estado estacionario, K_p , es incluida, y el tiempo muerto de proceso, $(T_0)_p$, es significativo, pero menor que el intervalo de tiempo simple, Δt .

La fig.20b ilustra la respuesta de lazo cerrado del proceso, estos son similares a los mostrados en la fig.19. Sin embargo, la recuperación en un Δt (es decir, en un tiempo simple) no se realiza para las condiciones indicadas. La adición de tiempos muertos del proceso cambian las características del proceso.

La cuestión ahora surge de si un controlador proporcional más integral puede usarse para permitir que la medición alcance el punto fijo después de un Δt cuando el proceso tiene adición de tiempos muertos, $(T_0)_p$, que son menores que el tiempo simple, Δt , presente. Cuando se introduce un cambio en el punto fijo a un proceso tal como el que se muestra en la fig.20a, se conoce que el error, e , resultante, es tal que: $\Delta e = \Delta r - \Delta c$ donde r es el punto fijo, y c es la variable controlada (medición).

Comenzando con la salida del controlador en la fig.20a, conocemos que un cambio en la salida del controlador, m , produce un cambio en la medida, Δc , tal que: $\Delta c = k_p \Delta m$.

La ganancia del bloque de tiempo muerto no es incluida en la ecuación anterior, porque la ganancia en estado estacionario de cualquier elemento de tiempo muerto puro es 1.

Para un controlador proporcional más integral, un cambio en la salida del controlador, Δm , puede expresarse en términos de sus componentes:

$$\Delta m = \left(\frac{100}{PB}\right) \Delta e + \left(\frac{100}{PB}\right) \left(\frac{e}{I}\right) \Delta t$$

Solucionando las ecuaciones anteriores, para Δm tenemos:

$$\Delta c = K_p \left[\frac{100 \Delta e}{PB} + \left(\frac{100}{PB}\right) \left(\frac{e}{I}\right) \Delta t \right]$$

Esta última ecuación puede modificarse cuando se considera lo siguiente:

1.- El término e en la ecuación es en realidad Δe porque todo el error ocurre cuando hay un cambio en el punto fijo, es decir: $e = \Delta e$.

2.- El término Δt es el tiempo simple del analizador. Sin embargo, el tiempo actual es Δt menor al tiempo muerto del proceso, o: $\Delta t - (\tau_{PT})_p$.

Cambiando la ecuación de manera que refleje los ajustes anteriores, tenemos:

$$\Delta c = K_p \left[\frac{100}{PB} \Delta e + \left(\frac{100}{PB}\right) \Delta e \left(\frac{\Delta t - (\tau_{PT})_p}{I}\right) \right]$$

$$\frac{\Delta c}{\Delta e} = K_p \left(\frac{100}{PB}\right) + \left(\frac{K_p}{I}\right) \left(\frac{100}{PB}\right) \Delta t - \left(\frac{K_p}{I}\right) \left(\frac{100}{PB}\right) (\tau_{PT})_p$$

El objetivo es tener $\Delta c = \Delta e$ en un periodo simple. Si $I = (\tau_{PT})_p$ tendremos:

$$I = \left(\frac{100}{PB}\right) \left(\frac{K_p}{(\tau_{PT})_p}\right) \Delta t$$

$$PB = 100 K_p \frac{\Delta t}{(\tau_{PT})_p} \quad e \quad I = (\tau_{PT})_p$$

Control de una relación.

El control de una relación es la forma simple de un control de alimentación directa en el que una variable de carga (flujo) es usada para calcular el punto fijo de otro lazo de control. Para la mayoría, el control de una relación concierne a la relación de flujo de corriente (gas, líquido o sólido, o sus combinaciones) con respecto a otro.

El control de una relación puede aplicarse en un modo manual, cuando se trabaja en mezcladores la relación de una cantidad con respecto a otra, o en un modo variable cuando la relación es ajustada continuamente (usualmente vía lazo retroalimentado).

El control de relaciones variables no será discutida en detalle, porque se debe manejar bajo control de alimentación directa, en donde se requieren conocimientos de instrumentos a escala. Este control se aplica cuando alguna propiedad del proceso o la entrada del proceso no es constante. En tales casos, un modo manual dará una relación inconsistente de las variables controladas y las desordenadas.

En el control de una relación, la variable controlada es en realidad el cociente R , de una variable a otra. Por ejemplo: $R = F_a/F_b$, donde F_a es la velocidad de flujo del material A, y F_b la velocidad de flujo del material B.

Características no lineales de un control de relación.

La fig.21a ilustra la relación de flujos de proceso, donde R es la variable controlada. Un examen de las características de ganancia del proceso (suponiendo que F_a varía) es:

$$R = F_a/F_b$$
$$dR/dF_a = 1/F_b$$

Cambiando la variable manipulada de F_a a F_b porque F_a es la variable descontrolada, tenemos: $dR/dF_b = -F_a/(F_b)^2$.

Estas últimas ecuaciones diferenciales ilustran la naturaleza no lineal del proceso, cuando R es controlada directamente. En este arreglo, el lazo puede tomarse por el peor caso (es decir, baja velocidad de flujo). Esto resulta en un control lento y altas cargas. El problema es eliminado reorganizando la relación a: $F_a = R F_b$.

Con esta ecuación, una división no lineal es reemplazada por una multiplicación lineal (ganancia constante). La fig.21b ilustra el nuevo arreglo. Los bloques "R" (relación) y "FC" (controlador de flujo) normalmente se encuentran contenidos en un pieza de equipo llamada controlador de relación de flujo. Los rangos típicos para la relación, disponibles en los controladores son: 0 a 1, 0 a 2 y 0.6 a 1.3. El rango cambia de acuerdo a la aplicación. Estos rangos no son un límite que deba usarse; en la práctica deberá recordarse que el valor de la relación es esencialmente una ganancia, y que un valor alto hace que el cambio en el punto fijo sea más sensible cuando cambia la señal de flujo de la corriente descontrolada.

Para una aplicación dada, el factor principal en la relación es el nivel del transmisor que se maneja. Si la relación deseada es 10 a 1, los transmisores son seleccionados de forma que den una diferencia 10 a 1, en los rangos de flujo. Esta relación permite que los niveles de señal de cada transmisor sean iguales o muy cercanos a las velocidades de flujo actuales que varían de 0 a 100%. La relación que aparece en la pantalla del instrumento será fácilmente determinada.

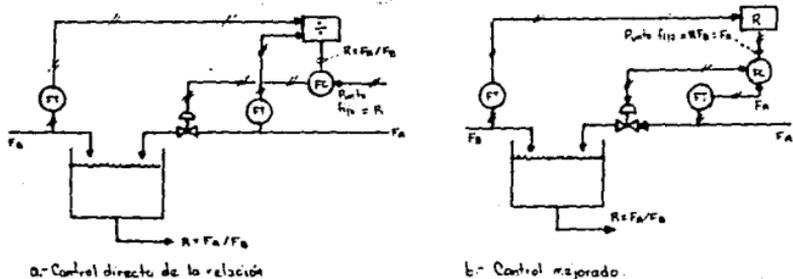


FIG. 21. CONTROL LINEAL VS. NO LINEAL DE UNA RELACION.

Control no lineal.

Algunas características típicas de la ganancia de un proceso se muestran en la fig. 22. En un proceso lineal (fig. 22a), la ganancia es constante y no es importante cuando el punto de control es fijo. Suponiendo que no hay elementos no lineales en el lazo de control, un controlador se ajusta a un punto fijo de operación estable sobre el rango completo de puntos fijos de operación.

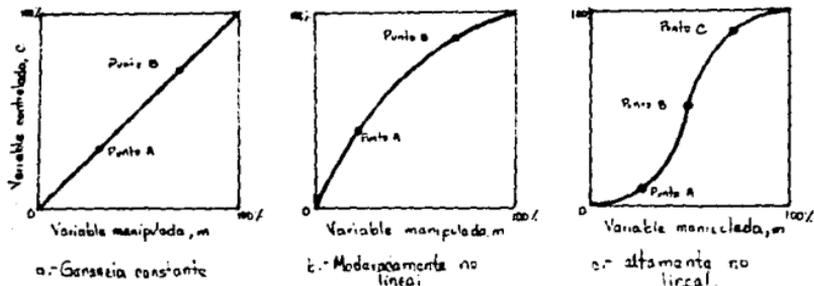


FIG. 22. CARACTERISTICAS TIPICAS DE LA GANANCIA DE ALGUNOS PROCESOS

La fig. 22b representa un proceso moderadamente no lineal, es decir, el cambio en la pendiente (ganancia) es igual o menor que 4 a 1 cuando la variable manipulada varía desde 0 a 100%. La ganancia del proceso es una función del punto de operación. Un controlador ajustado al punto A debe actuar de una forma más lenta que si el punto A se mueve al punto B. Similarmenete, un controlador ajustado al punto B deberá responder más rápido que si la operación del proceso cambia al punto A; y en el extremo deberá comenzar a ser marginalmente estable (oscilación sostenida), o frecuentemente inestable.

La fig. 22b es típica de muchos procesos del tipo termico. El camino más simple para dominar moderadamente la no linealidad de tal proceso es incluir otro elemento en el lazo, que tenga las características opuestas a las características de ganancia del proceso. Tal elemento es la válvula de porcentajes iguales, cuyas características son opuestas a las del proceso mostrado en la fig. 22b. La combinación resultante de la válvula más el proceso disminuye las características no lineales para el sistema. Si la combinación entre la válvula y el proceso fuera perfecta, las características resultantes serían completamente lineales.

Si un operando lineal tiene una relación de entrada/salida lineal, para un proceso, como el representado en la fig. 22b, un caracterizador de señales (que tenga características opuestas a las del proceso) deberá instalarse en la salida del controlador, esto dará como resultado características completamente lineales.

La fig. 22c es una curva típica de un proceso altamente no lineal, es decir, el cambio en la ganancia es tan grande que va de 10 a 1. Un proceso de pH (neutralización ácido-base) es típico. Los lazos de reflujos de temperatura también tienen características similares, cuando la diferencia entre los puntos de ebullición de dos componentes en una mezcla lineal, es muy grande.

Invariablymente, en este tipo de procesos, el punto de control es el punto B (es decir, para neutralización, pH=7). La ganancia del proceso es muy alta y se requiere que la ganancia del controlador sea muy baja, para mantener la estabilidad del lazo. Sin embargo, si un disturbio en la carga, mueve la medida al punto A o al C, el resultado es una ganancia de proceso muy baja, y un controlador con ganancia baja, causará que el proceso se suspenda en el punto A o en el C. La salida del controlador eventualmente adquiere suficiente reactivo para causar que la medida sobrepase el punto B. Esta secuencia de eventos se repite indefinidamente y si la marcamos en una carta, el área entre el punto A y C se rellena con muchas líneas.

Un proceso de pH se muestra en la fig.23 es una neutralización de un ácido fuerte-base fuerte, es controlada por un punto fijo a un valor neutro de $\text{pH} = 7$. Se calcula que la ganancia del controlador, G_c ; para este proceso es 0.003; y la banda proporcional, $PB = 100/G_c = 3.03$ (de acuerdo a las ecuaciones que se deducen para la ganancia).

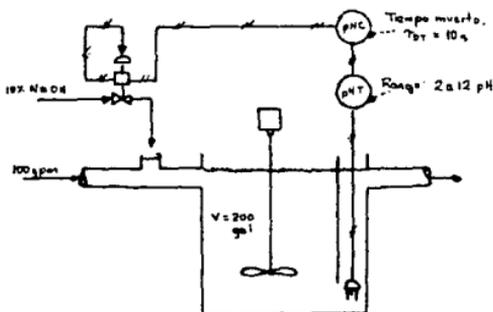


FIG. 23. PROCESO DE NEUTRALIZACIÓN.

La mayoría de los controladores industriales no tienen un ajuste de la banda proporcional arriba de 1000, cualquier intento para ajustar un lazo similar al del ejemplo anterior sería inútil. En la realidad, podemos hacer la suposición de que el controlador es inoperante, entonces se ajusta la banda proporcional fija en un valor límite.

Para manejar un proceso con características similares a las de la fig.23 o el ejemplo del pH, se requiere un controlador con características opuestas a las del proceso: este es ilustrado en la fig.24, donde la línea diagonal punteada representa un control con características lineales.

Los dos ajustes disponibles para su uso son: el ancho de la banda muerta y la pendiente de la línea dentro de la banda muerta, como se muestra esquemáticamente en la fig.24. La pendiente varía desde 0 a 1. A pendiente cero, la línea entre los puntos discontinuos es horizontal. A una pendiente de 1, las características no lineales son completamente eliminadas, y el controlador trabaja como un controlador lineal convencional, como la línea diagonal punteada en la fig.24.

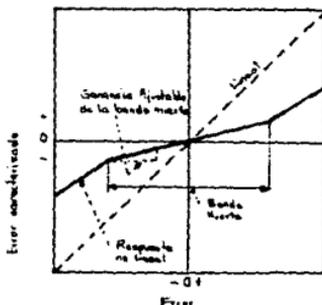


FIG.24. CARACTERÍSTICAS NO LINEALES DE UN CONTROLADOR.

La banda proporcional efectiva, $(PB)_e$, dentro de la banda muerta es:

$$(PB)_e = (PB)_0 / \text{Pendiente.}$$

donde $(PB)_0$ es la establecida por la banda proporcional en la pantalla del controlador.

CONTROLADORES DE SÍNTESIS DIRECTA Y ADAPTATIVOS.

Los controladores de síntesis directa (DSC) y los controladores de síntesis directa adaptativos (ADSC) pueden ser usados en lazos de composición, temperatura y presión de vapor. Estos son también efectivos para procesos con flujo turbulento y de transportación de sólidos, ya que estos lazos tienden a ser dominados por tiempos muertos. Pueden usarse fácilmente controladores retroalimentados adaptados en esquemas de control de alimentación directa.

Los controladores de síntesis directa suministran un medio para cuantificar la información del proceso en una forma sistemática y relativamente simple.

Los controladores de síntesis directa adaptativos nos dan una oportunidad para mejorar el control, además de adaptar los parámetros del modelo con base a la medición de las variables de proceso. Este uso adicional de la información caracteriza al proceso de útil y dinámico.

Nosotros discutiremos el diseño básico de un DSC para usarlo en un proceso de intercambio de calor. Este será también usado para mostrar como un ADSC puede diseñarse por adaptación de los parámetros del controlador para las variables del proceso.

El controlador de síntesis directa es diseñado por el desarrollo de un modelo del proceso para conseguir la respuesta deseada en la variable controlada. En muchos casos, los parámetros para el modelo del proceso varían como una función de las variables medidas, además puede usarse para adaptar continuamente los parámetros del modelo y mejorar la respuesta de la variable controlada por trastornos en la carga.

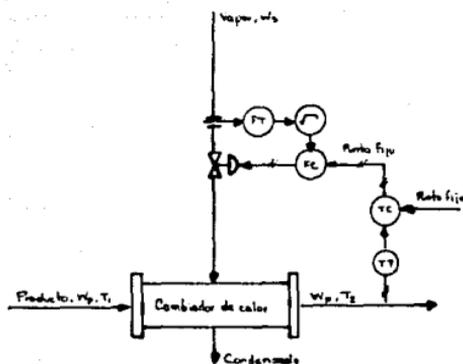
Diseño de un controlador de síntesis directa.

En el proceso de intercambio de calor de la fig.25a, el objetivo es calentar el producto, el cual fluye a una velocidad de W_p y entra a una temperatura T_1 , y sale a una temperatura T_2 , por la manipulación del flujo de vapor, W_s . Un método típico es el control en cascada. Aquí, el controlador de temperatura, TC, da el punto fijo para el controlador de flujo, FC. El controlador de flujo, un proporcional más integral (PI) estándar da la demanda de flujo de vapor, sin considerar el suministro de vapor y las características de la válvula de vapor.

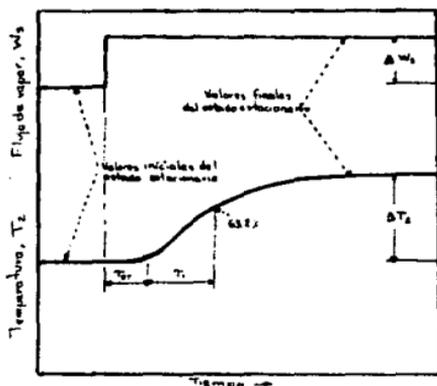
El lazo de flujo usualmente responde más rápido que el lazo de temperatura, y el controlador PI es suficiente. La temperatura de salida del cambiador responde lentamente al cambio en el flujo de vapor, porque toma tiempo superponerse al retraso asociado con la transferencia de calor a la corriente del producto.

También la velocidad de flujo del producto afecta el tiempo de residencia del lazo, porque para un flujo dado, toma cierta cantidad de tiempo el desplazar un volumen del producto en el tubo del cambiador.

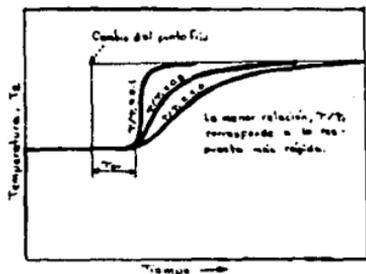
Antes de diseñar un controlador de síntesis directa para la temperatura de salida, debemos obtener primero un modelo del proceso en el lazo que cuantifica la variación de la temperatura de salida, con el flujo de vapor y para un flujo de producto dado, especificando antes la respuesta deseada.



a. Proceso



b. Respuesta a un cambio de paso



c. Respuestas bajo un control de lazo cerrado

FIG. 25. CONTROL DE TEMPERATURA PARA UN CAMBIADOR DE CALOR.

Modelo del proceso.- Con el control de temperatura en manual, o el controlador de flujo en local, se hace un cambio de paso en el controlador de flujo y se observa la respuesta de la temperatura de salida, T_2 . Durante el tiempo de respuesta para este experimento, se asume que el remanente de la variable de carga es relativamente constante.

La fig.25b muestra una respuesta típica. El tiempo se supone hasta que responde la temperatura, después del cambio de paso es inicialmente referido al tiempo muerto, T_m , del proceso. El tiempo se supone hasta que la temperatura alcance el 63.2% del valor final para este punto de partida, pero excluyendo el tiempo muerto definido como el retraso del proceso, T_1 . La ganancia del lazo en estado estacionario, K, es obtenida dividiendo el cambio en la temperatura por el cambio en el flujo de vapor o: $K = \Delta T_2 / \Delta W_s$, donde ΔT_2 es el cambio en la temperatura de salida en estado estacionario, y ΔW_s es el cambio en el flujo de vapor, como se muestra en la fig.25b.

La ganancia en estado estacionario, tiempo muerto y el retraso constituyen el modelo del proceso que es necesario para diseñar el controlador de síntesis directa.

Respuesta de lazo cerrado.- La respuesta deseada de la temperatura de salida, para un cambio del punto fijo, cuando la temperatura es controlada bajo un lazo cerrado (es decir, que el controlador de temperatura esta en automático), se muestra en la fig.25c. Como el tiempo muerto del proceso no puede ser acelerado o dominado, el tiempo muerto para la respuesta deseada del lazo es igual al tiempo muerto del proceso.

La ganancia en estado estacionario de la respuesta deseada del lazo cerrado, debe ser igual a 1. Esta garantiza, que la variable controlada retorna al punto fijo en el estado estacionario, después de un transitorio en la carga o un cambio en el punto fijo.

El cociente del retraso deseado del lazo entre el retraso del proceso T/T_1 , es usado para la velocidad de respuesta: como se muestra en la fig.25c, la respuesta rápida deseada y la pequeña es el cociente T/T_1 .

Las respuestas posibles para algún lazo de control se muestran en la fig.26. Para una respuesta sobre-amortiguada, la temperatura se aproxima lentamente pero no excede el punto fijo. Para una respuesta críticamente amortiguada, la temperatura se aproxima tan rápidamente como le es posible,

pero no sobrepasa el punto fijo. Aunque, una respuesta sub-amortiguada exhibe un comportamiento cíclico cuyo periodo es T_p , la magnitud de la respuesta periódica, decrece con el tiempo y, de este modo el lazo remanente es estable. En el otro lado, la respuesta sub-amortiguada tiene una oscilación uniforme de amplitud constante y periodo constante.

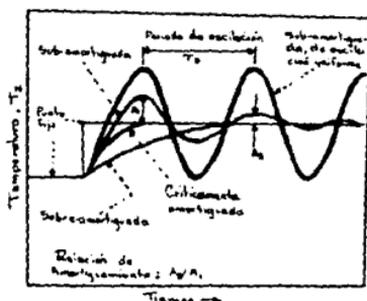


FIG.26. RESPUESTAS POSIBLES PARA EL LAZO DE CONTROL.

Para una respuesta sub-amortiguada ver fig.25c, la amplitud del segundo máximo dividido por la amplitud del primer máximo es el término del cociente de amortiguamiento, ζ , o $\zeta = A_2/A_1$. El cociente de amortiguamiento es pequeño, si la respuesta es más amortiguada.

El modelo para el DBC es usado en forma complementaria. Por ejemplo, la ganancia del controlador; K_c , es el inverso de la ganancia de proceso, K , un incremento o decremento en la ganancia del controlador sobre el valor de $1/K$ produce la respuesta que se muestra en la fig.26. En esencia, el grado deseado de amortiguamiento es obtenido multiplicando la ganancia del controlador por la ganancia de amortiguamiento, K_c , la ganancia del controlador es definida como: $K_c = T_p / \zeta$.

La ganancia de amortiguamiento se usa para fijar el amortiguamiento deseado para la respuesta. Para una respuesta sub-amortiguada es el cociente de amortiguamiento fijo o deseado. Por supuesto, la ganancia de amortiguamiento puede fijarse en un valor bajo para obtener una respuesta sobreamortiguada que no sobrepase el punto fijo.

Por variación en el retraso del lazo cerrado, se obtiene el período de oscilación deseado, τ_c . Como el cociente del retraso deseado en el lazo cerrado entre el retraso del proceso, τ , se hace pequeño, la respuesta será rápida y el período de oscilación para el proceso será pequeño, τ_b .

Resumen del diseño.- Los principales elementos de un controlador de síntesis directa, para la temperatura del cambiador de la fig.25 son: 1) el modelo del proceso, consistente de una ganancia de estado estacionario K , tiempo muerto T_m y el retraso τ ; y 2) la respuesta deseada, así como la ganancia de amortiguamiento elegido β , y el cociente para el tiempo muerto deseado para el retraso de proceso τ/τ_c . Este procedimiento se resume en la fig.27a.

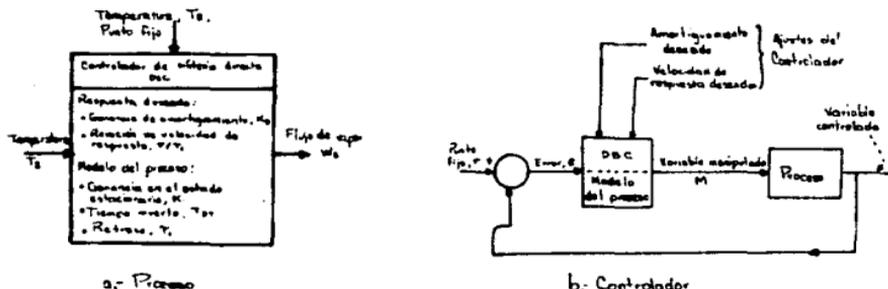


FIG.27.ELEMENTOS DE UN PROCESO Y MODELO DEL CONTROLADOR DSC.

La fig.27b muestra un controlador de síntesis directa que contiene el modelo del proceso implícitamente, es decir, los complementos controladores del proceso. La fig.27b también muestra esquemáticamente los ajustes (amortiguamiento deseado y velocidad de respuesta deseada) de la variable controlada. Estos son afinaciones de ajuste, y no hay acciones proporcional, integral o derivativo para ajustar, como es propio del controlador PID. Incluso si el modelo de proceso es más complejo del que será usado, los parámetros de ajuste para el DSC deberán ser el amortiguamiento deseado y la velocidad de respuesta.

La ecuación para el controlador es:

$$M_n = \beta M_{n-1} + (1-\beta) M_{n-2} + K_1 (E_n - \alpha E_{n-1})$$

donde $K_c = (1-A)/CK(1-\alpha)$, $\alpha = \exp(-T/\tau)$, $\beta = \exp(-T/\tau)$, $\epsilon = \mu - c$, K es el punto fijo, c es la variable controlada, M la variable manipulada, T es el tiempo de prueba, K es la ganancia del modelo del proceso, τ es el retraso del modelo de proceso, T_m es el tiempo muerto del proceso, T , retraso para la respuesta deseada en el lazo cerrado, n es el número entero más próximo de T_m / T , n es el número ordinario de pruebas, $n-N-1$ es el número de pruebas $(N+1)$ que se hacen en el tiempo de prueba.

En muchos procesos, la ganancia en estado estacionario y el tiempo muerto son varios, principalmente como una función de las variables que son medidas. Para tales situaciones la medición de variables puede adaptarse a los parámetros del modelo y, de este modo suministrar un mejor control. Esto es consistente con la filosofía de usar la mayor información alrededor del proceso con un orden posible para suministrar este control.

Control de síntesis directa adaptativo.

En el ejemplo del cambiador de calor, la ganancia varía inversamente con el flujo del producto. Si el flujo del producto es dividida en dos, la temperatura cambiara el doble, así como para algún cambio en el flujo de vapor. El tiempo muerto también varía inversamente con el flujo de producto porque el volumen de los tubos del cambiador es constante. Así como el flujo se incrementa, toma menos tiempo desplazar el líquido en el cambiador. Las pruebas para el cambiador de calor muestran que el retraso del proceso también varía inversamente con el flujo del producto.

Una curva típica que caracteriza la ganancia en estado estacionario como una función del flujo del producto se muestra en la fig. 28 (donde la ganancia es expresada en múltiplos de la ganancia completa o 100% del flujo de producto). Así como el flujo de producto se aproxima a cero, la ganancia se hace infinita, para evitar la división por cero (para cero flujo), la ganancia se mantiene constante, fijo, hasta elegir algún valor de flujo, en este caso 10%.

La caracterización del proceso, tiempo muerto y retraso son similares a las características para la ganancia, porque también varían inversamente con el flujo. De esta manera, los parámetros del proceso son contenidos por el uso de una curva característica, como la de la fig. 18 o por computación directa de las relaciones inversas. En cada caso, el flujo de producto, es usado para adaptar la ganancia al modelo del proceso, τ , el tiempo muerto T_m , y el retraso T .

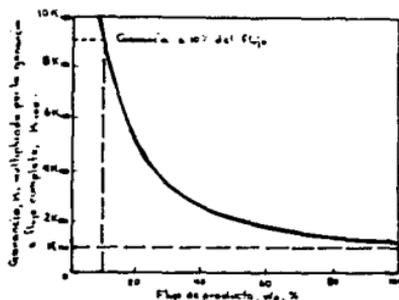


FIG.28.GANANCIA EN EL ESTADO ESTACIONARIO COMO FUNCION DEL FLUJO.

Por otra parte, la velocidad de respuesta es también adaptada, porque el retraso en la respuesta deseada es fijo en el cociente para el retraso del proceso. Ya que la ganancia del modelo del proceso es adaptada por el flujo del producto, la ganancia de amortiguamiento, (puesto que es fija) suministra en todo caso el amortiguamiento deseado del flujo del producto.

El controlador de síntesis directa adaptativo es el mismo, así como el controlador de síntesis directa, con la adición de la caracterización del modelo de proceso como una función del flujo del producto.

COMO USAR LOS LAZOS RETROALIMENTADOS PARA SATISFACER LAS CONDICIONES DE PROCESO.

Los controladores de retroalimentación múltiple combinados con otros equipos son medios para diseñar un sistema de control para manipular las dificultades que se encuentran frecuentemente en un sistema de proceso.

Examinaremos los principios de los controladores de retroalimentación múltiple y otros elementos procesadores de señales, como un medio para solucionar problemas de control más difíciles. Los elementos procesadores de señales, tales como selectores, funciones aritméticas y apagadores, y sus usos

serán discutidos. Esta discusión incluirá esquemas de control en paralelo, en cascada, proporcional con impedimento, salida múltiple y por pesos, en compañía de los dispositivos y circuitos para implementar tales esquemas.

Control en paralelo.

Un ejemplo simple de control en paralelo es el uso de controladores múltiples para mantener una variable controlada, como un control de nivel (LC) ver fig.29. Aunque el nivel en el tanque filtrante podrá normalmente mantenerse por la manipulación del flujo de salida (lavado), se usa un segundo controlador para manipular una válvula de traspaso para asegurar que el líquido está presente siempre en el lado de succión de la descarga de la bomba.

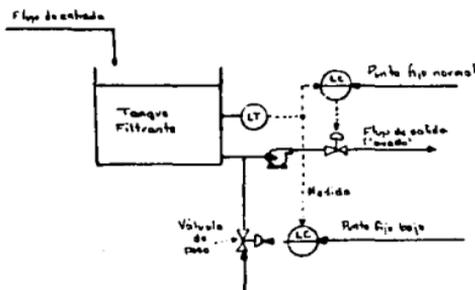


FIG.29. CONTROL EN PARALELO.

El punto fijo del segundo controlador deberá ser más bajo que el del primero, y la banda proporcional deberá ser relativamente estrecha. Una condición de nivel bajo causará el cierre de la válvula para abrir rápidamente el suministro de protección a la bomba. Un tercer controlador en paralelo (cuyo punto fijo es más alto que el del primer controlador) y una válvula de descarga para prevenir una inundación del tanque.

El concepto general de un controlador variable con n controladores y n variables manipuladas se muestra en la fig.30. El punto fijo de dirección, deberá ser a valores diferentes, y el ajuste de la banda proporcional cubrirá diferentes rangos de la variable controlada. Deberá elegirse

mucho cuidado en la selección de los puntos fijos y el ajuste de la banda proporcional para los respectivos controladores, para obtener la acción deseada en la válvula y para dar el valor deseado de la variable controlada.

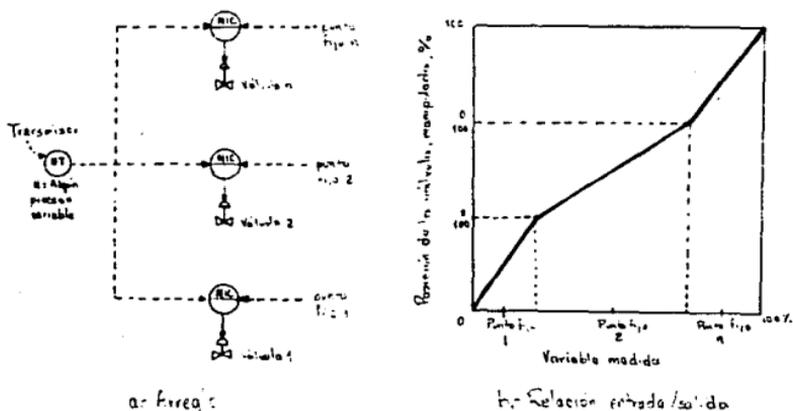


FIG. 30. OPERACION EN PARALELO PARA EL CONTROL DE UNA VARIABLE Y VARIAS VARIABLES MANIPULADAS.

Control en cascada.

Un controlador retroalimentado usa una variable controlada (single medida) para una variable fija manipulada. Frecuentemente, hay un proceso adicional de información, particularmente variables de carga, que pueden suministrar el funcionamiento de un lazo de control.

Por ejemplo, una aplicación se muestra en la fig. 31a, en la que se suministra un control de temperatura para la corriente que deja un calentador a fuego directo. Aquí, la variable manipulada es la posición de la válvula de combustible-gas. El cambio en la presión del combustible en el calentador (disturbios de carga) causarán un cambio en el flujo de combustible, y eventualmente, un trastorno en la temperatura. Los disturbios de carga pueden ser eliminados introduciendo una medida adicional para el flujo de combustible y un controlador del flujo de combustible (cascada).

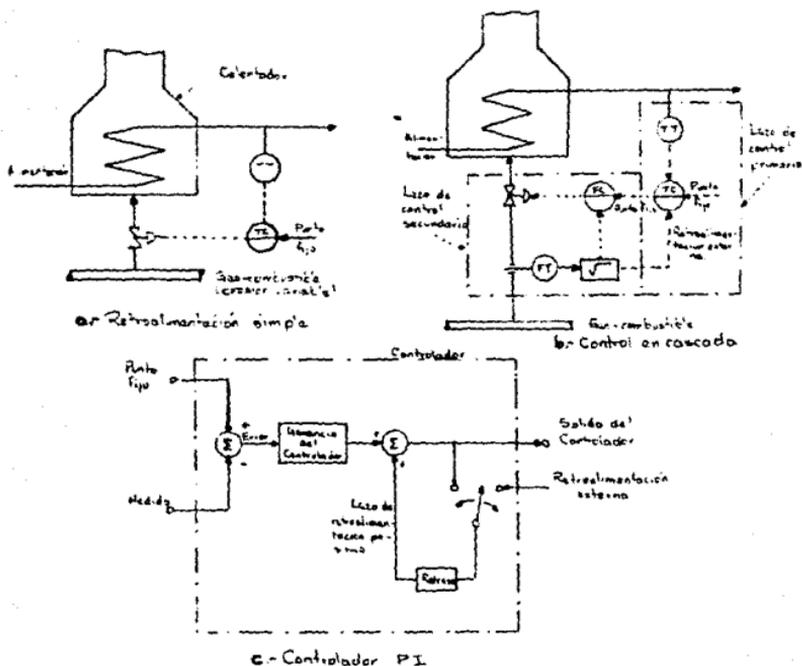


FIG. 11. CONTROL DE TEMPERATURA EN CASCAIDA

El controlador de temperatura (TC) ahora manipula el punto fijo del controlador de flujo de combustible (FC), el cual en su turno manipula la posición de la válvula de combustible. Esta es la clásica estructura de un control en cascada para controladores retroalimentados.

Sin embargo, un aspecto importante es que comienza a ser dependiente de los dispositivos de control. Por ejemplo, suponemos que el interior del lazo de control de flujo es puesto en manual. Como el lazo de control de temperatura no debe manipular el flujo de combustible, tiende a causar un error en el control de temperatura. Este controlador deberá saturarse a pesar de su salida al máximo, por que se desactiva integral. En el ejemplo, la saturación integral es prevenida por una alimentación retroalimentada, al flujo de combustible desde para el controlador de temperatura.

Para entender esto, veamos la construcción típica de un controlador en la fig. 11a, aquí el error de la señal es multiplicado por un término de ganancia (100 dividido por la ganancia proporcional), y el producto es integrado (ya retrasa de orden orden en un lazo positivo retroalimentado).

Algunos errores no son cero y causarían que el controlador eventualmente se saturara, a menos que el lazo reactivo retroalimentado sea abierto. La fuente de la señal para el retraso en el lazo positivo retroalimentado puede obtenerse de la salida del controlador o de una señal retroalimentada externa. Aquí, el uso de una señal retroalimentada apropiada para abrir el lazo, previene una saturación integral del controlador que es usado en cascada y otros esquemas.

La retroalimentación externa se muestra en la fig. 11b. El controlador de temperatura (TC) es protegido de la saturación integral por una conexión externa de retroalimentación. Cuando el controlador de combustible trabaja normalmente, el punto fijo y la acción son iguales. Por lo tanto, el término integral, en el controlador de temperatura opera normalmente. Si el lazo de control de combustible es abierto (acción diferente del punto fijo), se produce un efecto que abre el lazo integral del controlador de temperatura y limita la salida. Esta técnica es útil para prevenir la saturación integral, no es importante que cause, que el lazo externo (temperatura) alcance el punto fijo.

Control de la posición de la válvula.

Una aplicación en la cual la posición de la válvula es considerada como una variable controlada, se muestra en la fig. 12, en la cual un compresor de aire descarga en un depósito con múltiples demandas del proceso como variables. La presión del depósito, es mantenido por un lazo de control de presión, por el cual, se regula la entrada al compresor. Normalmente, la presión del depósito es el punto fijo y se mantiene lo suficientemente alto, para los casos de demandas máximas de alguna área del proceso, y se encuentra lejos de la saturación del correspondiente control de la válvula. Mientras que esto asegura la acción del propio control, el esquema consume energía durante estos períodos, cuando el proceso tiene una demanda baja, sea la presión y el control de la válvula es alto.

Es deseable que el regulador controle con la pérdida para un tiempo, cuando las demandas del proceso son variables. La energía por esto, la posición de la válvula puede usarse para un índice de demandas, se dice, para una parte de parte el

control de la válvula tendrá que cerrar. Podrá determinarse, cuál válvula tiene la abertura mayor, usando un selector alto para elegir la mayor salida de la señal de entrada; para un selector bajo, la salida deberá ser menor de la señal de entrada.

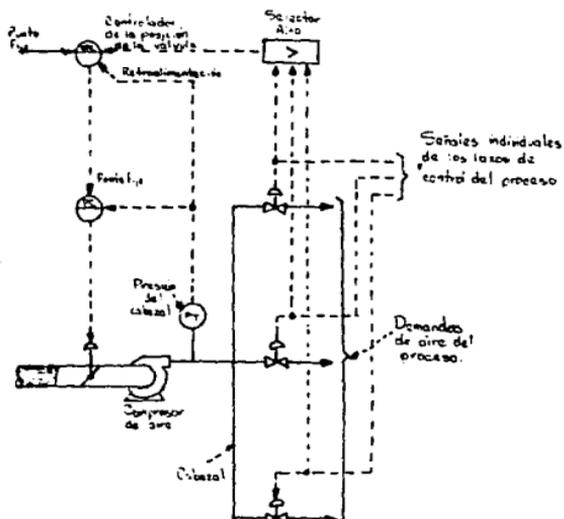


FIG. 32. POSICIÓN DE LA VÁLVULA REPRESENTANDO UNA VARIABLE CONTROLADA.

La salida del selector alto puede alimentarse a un controlador de la posición de la válvula, cuyo punto fijo podrá ser igual al valor que permite las demandas del proceso, que se encuentran en las áreas del respectivo proceso, fuera de la saturación (es decir, alcanzar el 90% del control de la válvula). La salida del controlador de la posición de la válvula será que el punto fijo este en cascada, para el control de presión.

Si la válvula tiene una abertura mayor que el 90% de la abertura, el controlador de la posición reducirá el punto fijo para el control de presión, éste tenderá a abrir la otra

válvula de control para minimizar las pérdidas del regulador. La retroalimentación externa suministra protección contra el término integral (saturación) para el controlador de la posición de la válvula cuando el controlador de presión este bajo operación manual.

Control proporcional.

La mezcla de ingredientes sólidos o líquidos, o ambos, en una base continua, frecuentemente requiere de mantenimiento de una proporción de ellos. La implementación es de dirección, dependiente del dispositivo de control, pero el requerimiento es para llevar a cabo una computación aritmética, dentro del esquema normal de control. Este requerimiento introduce el dispositivo proporcional, el cual consta de una señal de entrada, multiplicada por algún dispositivo proporcional externo, y una salida, que es el producto.

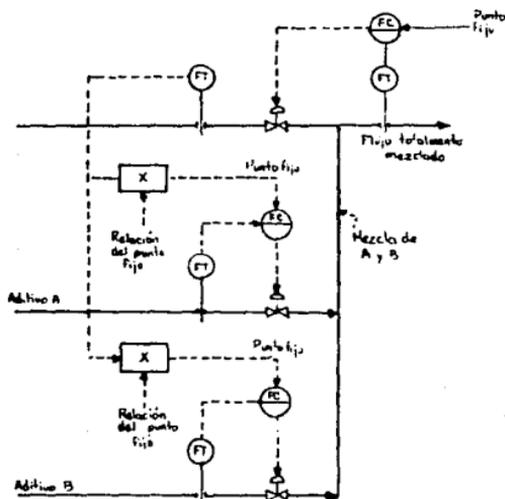


FIG.33. PROCESO DE MEZCLADO BAJO CONTROL DE UNA RELACION.

La fig.33 ilustra una aplicación de mezclado. Los aditivos A y B son mezclados en un cabezal en proporciones fijas, y el mezclado total controlado por alguna velocidad de flujo total. Para controlar la adición de aditivos, se mide el flujo en el cabezal (la medición del flujo es lineal, en este caso), por un transmisor de flujo (FT), esta señal es procesada por medio del respectivo bloque proporcional para los aditivos A y B y así generar el punto fijo para el controlador de flujo de aditivos (FC). El flujo total de la mezcla del producto es controlada por la medición del flujo total, y manipulando la válvula de control en la línea del cabezal.

Suponiendo que la disponibilidad del aditivo B es limitada, para este flujo el punto fijo es bajo, produciendo un producto fuera de especificación. Es deseable reconocer esta situación desde el esquema de control, y así tomar la acción correctiva. Por ejemplo, el esquema puede modificarse de manera que reduzca el flujo total para el punto donde el flujo del aditivo B sea igual a este punto fijo, de este modo es reestablecido la proporción ideal. El mezclado de un producto deberá ser bajo la especificación, aunque en una velocidad de flujo total reducida.

Selección de la señal.

Una colección de técnicas que incorporan la lógica para suministrar la acción de control apropiado, surgen por un evento, tal como una acción operadora o un proceso constante.

Un ejemplo simple para usar la lógica para solucionar un problema de control es la selección de la señal. En aplicaciones críticas, la falla de un transmisor simple en un lazo de control puede o no tolerarse, ya que esto creará una condición peligrosa o causar un tiempo perdido inaceptable. Por lo tanto, se pueden usar hasta 2 transmisores para medir una variable simple. Un medio de procesamiento de estas señales, se hace necesario para dar una indicación segura de la variable controlada, aún si uno de los transistores falla.

La fig.34 representa una solución particular, aquí selectores altos y un selector bajo son combinados para generar un valor medio. Para la configuración que se muestra, si un transmisor falla (un alto o un bajo) la salida resultante no será materially afectada, mientras que el ejemplo es simple, presenta un concepto fuerte que usen los selectores, como los interruptores, para alterar la señal procesada.

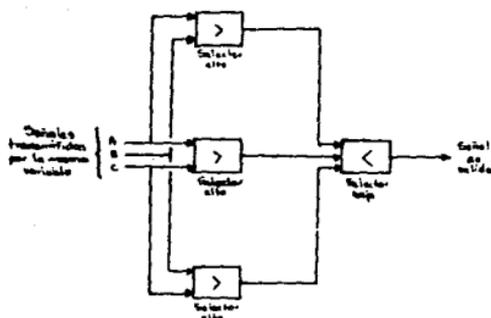


FIG.34. SELECTOR MEDIO QUE ASEGURA UNA SEÑAL DE LA VARIABLE CONTROLADA SI EL TRANSMISOR FALLA.

Control restringido.

En la planeación de un esquema de control de proceso, no es común encontrar situaciones donde procesos restringidos requieran una estrategia de control muy compleja. El reactor simplificado que se muestra en la fig.35 tiene corrientes de reactantes que entran, y una corriente de un producto simple, que sale. La composición del producto es controlada por el tiempo de residencia y, por lo tanto, el flujo de corriente que sale. Sin embargo, para prevenir una condición crítica de sobrepresión, puede ser necesario un controlador de composición, para rechazar el producto, como se muestra en la fig.35.

Bajo condiciones de operación normales, el controlador de composición manipula el punto fijo del controlador de flujo del producto. La presión deberá ser tan baja como el punto fijo del controlador de presión (presión restringida en el reactor). Bajo condiciones anormales, (trastornos en la composición, en los reactantes) cuando la presión comienza a subir por encima del punto fijo, el controlador de presión rechazará la señal del controlador de composición via el selector alto. El controlador de presión deberá ahora manipular el punto fijo del controlador de flujo de producto, de manera que no exceda la presión del punto fijo. Así como, en condiciones normales retorna, la salida del control de presión, decrecerá hasta que el controlador de temperatura recupere el control del flujo de producto. Ambos

controladores tienen una acción incremento-incremento, es decir, un incremento en la medida causa un incremento en la salida.

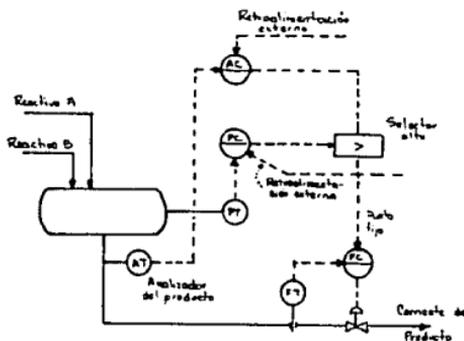


FIG. 35. CONTROL RESTRINGIDO.

En este esquema, la salida del selector alto se usa como una retroalimentación externa, para los controladores de presión y de composición. Esto es una protección contra el término integral para el controlador que no tiene control sobre el flujo de producto, y una transición uniforme del control de composición al controlador de presión. La fuerza de este concepto de retroalimentación externa es evidente, y será usado en las técnicas de control siguientes.

Control de salidas múltiples.

El control de una variable simple con la manipulación de múltiples variables similares, se encuentra frecuentemente. Consideremos un compresor múltiple que descarga en un cabezal común, como se muestra en la fig. 36. El objeto del control es mantener la presión del cabezal por manipulación de la válvula de descarga del compresor. En el diseño de este esquema de control de presión, es importante asegurar que:

- La ganancia del lazo sea constante e independiente del número de compresores en servicio.
- La tendencia a ser independientes de cada compresor es permitida, de modo que la proporción de la carga total recibida por un compresor dado pueda ser ajustada.

* Es posible el control manual de cada válvula, de cada compresor.

* Cada válvula de descarga del compresor es restringida, independientemente, sin transtornar por completo el funcionamiento del lazo de presión.

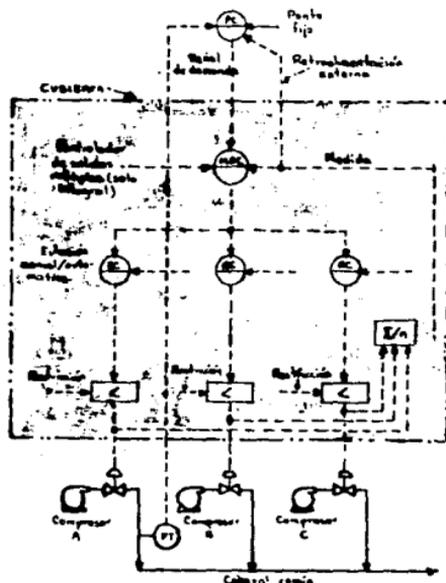


FIG.36. CONTROL DE SALIDAS MÚLTIPLES.

Estos objetivos se logran por el esquema que se muestra en la fig.36, el corazón del cual se muestra dentro de la zona sombreada. Un controlador muy rápido, solo integral, ajusta el nivel de la señal para la respectiva válvula, simultáneamente para mantener el punto fijo de la demanda. Este lazo puede ser muy rápido porque contiene solo equipos componentes, que tienen una dinámica insignificante (la retroalimentación de este lazo es un valor promedio de las señales para la válvula de descarga respectiva, y no la posición actual de la válvula).

La suma (Σ/N) computa el promedio de las señales de la posición de la válvula, como una sola medida, para el controlador solamente integral. El controlador manual (PC) en la válvula de descarga provee de ambas habilidades, un control de la señal de la válvula relativo a los otros, y para introducir manualmente la señal de control de la válvula en forma de carga base para un compresor dado, o sacarlo completamente de servicio. El selector bajo también permite para un compresor dado ser restringidos independientemente de los otros transtornos fuera del lazo de control de presión.

Este esquema permitirá a la presión del cabezal ser controlada hasta que todas las estaciones estén en manual, o todas las válvulas de descarga del compresor sean restringidas y/o saturadas. En ambos casos, el controlador de presión es protegido de su término vía retroalimentación externa del promedio de las señales de las válvulas.

Medidor en paralelo.

Controlando una variable simple vía manipulación de N variables diferentes es una situación que se encuentra frecuentemente en un control de combustión. Una aplicación simple es una caldera controlando la presión del cabezal con un combustible único, y una fuente de combustión de aire única. Para mantener la presión en el cabezal bajo condiciones de carga variables, combustible y aire deberán ajustarse en paralelo. Esto satisficará el objetivo de control para mantener la presión, pero no será necesariamente seguro el proceso de operación.

Las características que deberán ser incorporadas por seguridad incluyen:

- 1.- Permitir al aire, salir al combustible para un incremento en la carga.
- 2.- Permitir al aire un atraso hacia el combustible, para una disminución de la carga.
- 3.- Se requiere un flujo de combustible para ser disminuido en una condición de falla en el flujo de aire.
- 4.- Se requiere de un flujo de aire para ser incrementado, en un aumento de flujo de combustible.

Encontramos que estos requerimientos asegurarán que el flujo de gas no exceda el flujo de aire. El esquema del medidor en paralelo se muestra en la fig. 17, encontramos estos criterios de diseño (por claridad, solamente se muestra el esquema de control, los componentes de la caldera son omitidos). Los flujos de aire y combustible son controlados vía sus respectivos controladores de flujo. La salida del

controlador de presión ajusta el punto fijo de estos controladores de flujo en paralelo. Sin embargo, los puntos fijos pueden restringirse vía los selectores alto y bajo.

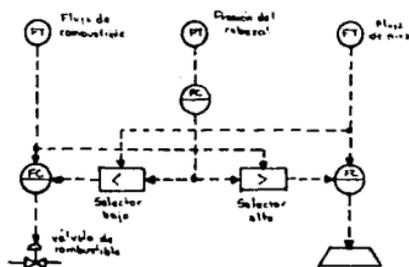


FIG. 77. CONTROL CON MEDIDOR EN PARALELO.

De acuerdo con los requerimientos de diseño, la salida del controlador de presión se incrementa si la carga de vapor se incrementa. Sin embargo, el selector bajo no asignará el flujo de combustible un incremento en el punto fijo hasta que el flujo de aire se incrementa. De este modo, el aire conduce al flujo de combustible a un aumento de carga. Para una carga menor, el selector alto asegurará que el aire retrase el flujo de combustible.

Supongamos ahora que el flujo de aire decrece para una carga dada, porque interviene un operador, o alguna otra causa. El decremento de la señal de flujo de aire actúa a través del selector bajo, que automáticamente disminuye el punto fijo del flujo de combustible. Correspondientemente, un incremento en el flujo de combustible para una carga dada automáticamente incrementará el punto fijo del flujo de aire a través del selector alto.

Control con disponibilidad restringida.

Un esquema de control de combustiones para un calentador a fuego de tiro natural, suministrado con dos combustibles (uno restringido para limitar su disponibilidad) se muestra en la fig. 78.

El objetivo es mantener la salida de la temperatura del producto a la salida del calentador. Las variables manipuladas serán consumo de gas restringido por disponibilidad y velocidad de flujo del gas natural. La presión, se usará en el consumo de gas en el calentador como un índice de disponibilidad. En el diseño del esquema de control, es importante asegurar que:

- El consumo de gas y/o gas natural puedan ser manipulados para mantener la temperatura.
- La temperatura puede mantenerse no con un choque, cuando el flujo de gas consumido sea restringido.

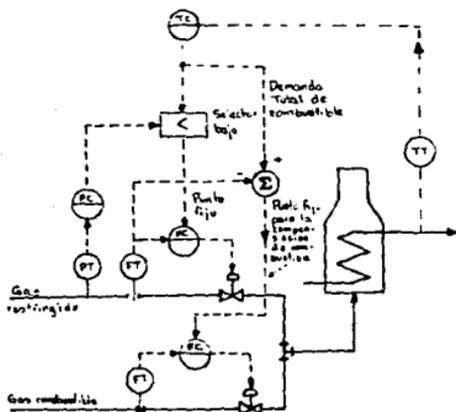


FIG.38. CONTROL CON DISPONIBILIDAD RESTRINGIDA.

El flujo de gas consumido y gas natural es regulado vía controlador de flujo respectivos. La salida del controlador de temperatura puede proponerse como la variable manipulada, o la demanda total de combustible. El objetivo es usar el consumo de gas restringido, preferentemente. La salida del consumo de gas del controlador de presión del calentador puede proponerse como el restringido. De este modo, el punto fijo del controlador de flujo de consumo de gas, es la salida del controlador de temperatura limitada por la restricción vía selector bajo.

El combustible adicional para cumplir con la demanda es determinado por la saturación del flujo del consumo de gas de la demanda total. Esta diferencia es el punto fijo del controlador del flujo de gas natural. Por lo tanto, algún descenso en el flujo de consumo de gas para una demanda total dada resulta en un incremento en el flujo de gas natural que compensa. Aún si el operador ordena al controlador de flujo de consumo de gas en manual, y cerrada la válvula del consumo de gas, la temperatura deberá mantenerse.

Control por pasos.

El esquema mejorado de un control proporcional se muestra en la fig.39, usa las posiciones de las válvulas para los aditivos A y E como un índice de disponibilidad. Si cada válvula no puede abrirse más de 95%, la disponibilidad es de cada aditivo será limitada. En este caso, la posición de la válvula de flujo del cabezal será rechazada. El flujo del cabezal, y por lo tanto la demanda de aditivos, será reducida (produciendo que el controlador de flujo de aditivo este en control inverso).

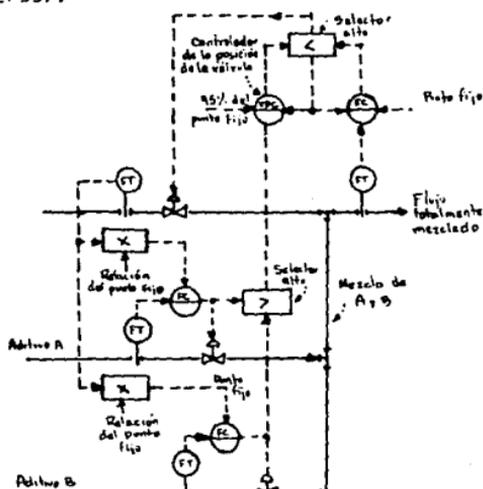


FIG. 39. CONTROL POR PASOS.

El selector alto se usa para determinar cuál válvula de aditivo está más abierta. El controlador de la posición de la válvula (VPC) asegura que la válvula no se abrirá más del 95% por rechazo del controlador de flujo total de producto vía selector bajo. Las posiciones de la válvula y el controlador de flujo total de producto son protegidas del término integral por reintroducción retroalimentada de la salida del selector bajo. El flujo total disminuirá pero las proporciones de las velocidades de flujo de A y B a la velocidad de flujo del cabezal serán mantenidas, de modo que no haya producto fuera de especificación.

CAPITULO VII

SIMULACION DINAMICA DE PROCESOS.

La simulación dinámica de procesos contempla el análisis de todas las relaciones físicas que permiten desarrollar y resolver en forma subsecuente, una serie de ecuaciones matemáticas.

En la industria de procesos químicos se pueden presentar diferentes situaciones anormales, las cuales se deben prevenir mediante un diseño que considere emergencias, y desastres potenciales en la planta. Fundamentalmente se deberá dar respuesta a la pregunta "¿Que pasaría si...?", situación que debe analizarse antes que la planta este construída.

Históricamente se ha querido estudiar este tipo de problemas, desde la década de los 40's o antes y hasta la fecha se han identificado en forma global las fallas por las siguientes causas:

- (1) Falla en el suministro de potencia.
- (2) Deficiencia en el suministro de agua de enfriamiento.
- (3) Deficiencia en el suministro de vapor.
- (4) Fallas en el suministro de agua contra incendio.
- (5) Perturbaciones causadas por incendio, explosión, derrames, etc.
- (6) Reacciones químicas fuera de control.

La mayoría de los problemas involucrados con la ingeniería química, presentan condiciones delicadas y en algunas ocasiones drásticas, por lo que el uso de técnicas de simulación de dinámica de procesos será de mucha utilidad para:

- a) Optimizar la inversión.
- b) Optimizar costos de operación.
- c) Lograr un control automático adecuado.
- d) Proporcionar los procedimientos de arranque, paro y emergencia, lo más adecuados y seguros posibles.

Por las razones anteriormente expuestas es fundamental que el ingeniero químico este familiarizado con el análisis dinámico de procesos, razón por la cual a continuación se presentan los métodos y procedimientos para llevar acabo dicho análisis y se dan algunos ejemplos para ilustrar su aplicación.

Fundamentos básicos.

En la solución de cualquier problema el primer paso consiste en definirlo, y una vez definido se procede a establecer la manera de resolverlo. En el caso de la simulación de procesos, una vez definido el problema se aplican las ecuaciones de conservación de masa, energía y momentum para cualquier sistema dado. Estas ecuaciones son:

$$\text{Flujo que entra} - \text{Flujo que sale} + \text{Producto de reacción} = \text{Acumulación}$$

$$\text{Energía que entra} - \text{Energía que sale} + \text{Energía de reacción} = \text{Energía acumulada}$$

$$\text{Suma de fuerzas que actúan} = \text{Cambio de momentum}$$

Los problemas en ingeniería química se pueden agrupar en dos grandes categorías:

- A) Sistemas que varían con el tiempo: problemas de tanques.
- B) Sistemas que varían con el tiempo y la posición: problemas de tuberías.

A su vez de acuerdo al tipo de análisis se pueden clasificar como:

- I) Macroscópicos
- II) Microscópicos

Para fines de ilustración se usará el sistema mostrado en la fig.1. las ecuaciones básicas se pueden plantear si se establece que el flujo de corriente (F_A , F_B) es de 10 ft^3/h y el flujo del tanque, F_0 , es 20 ft^3/h . ¿Que pasaría si en un tiempo, t , el flujo de F_A , se incrementa a 15 ft^3/h ? El problema consiste en determinar que pasa con la composición de F_0 , como una función del tiempo.

Para resolver el problema se debe establecer lo siguiente:

- 1) El fluido es incompresible.
- 2) No hay cambio en el volumen durante la mezcla de los dos líquidos.
- 3) La temperatura permanece constante en el sistema.

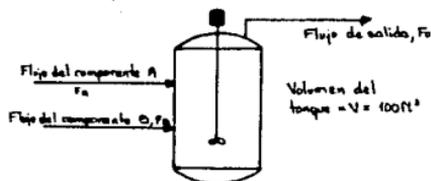


FIG.1. PARAMETROS PARA UN TANQUE CON MEZCLADO.

Ecuaciones básicas:

Entrada: $F_A + F_B = 15 + 10 = 25 \text{ ft}^3/\text{h}$

Salida: $F_o \text{ ft}^3/\text{h}$

Reacción: no hay reacción.

Acumulación: $dV/d\theta \text{ ft}^3/\text{h}$

$x_A + x_B = 1$

donde V es el volumen en el sistema y θ es el tiempo, x_A y x_B se definen como la fracción de volumen de los líquidos A y B.

Resolviendo las ecuaciones anteriores queda:

Entrada: $F_A x_A + F_B x_B = 15(1) + 10(0) = 15 \text{ ft}^3 \text{ de A/h}$

Salida: $F_o x_A \text{ ft}^3 \text{ de A/h}$

Reacción: no hay reacción.

Acumulación: $d(Vx_A)/d\theta$

Debido a que la composición de A en el tanque y en F_o son iguales este problema se puede tratar macroscópicamente y manipulando las ecuaciones anteriores llegar a:

$$F_A x_{A1} - F_o x_A = d(Vx_A)/d\theta \quad (1)$$

$$F_A - F_o x_A = V dx_A/d\theta \quad (2)$$

$$\int_{0.5}^{x_A} \frac{dx_A}{\left(\frac{F_A}{F_o} - x_A\right)} = \int_0^{\theta} \left(\frac{F_o}{V}\right) d\theta \quad (3)$$

$$x_A = \frac{F_A}{F_o} - \left[\frac{F_A - 0.5F_o}{F_o}\right] \exp(-F_o\theta/V) \quad (4)$$

Los resultados de esta ecuación matemática se pueden representar en la fig.2.

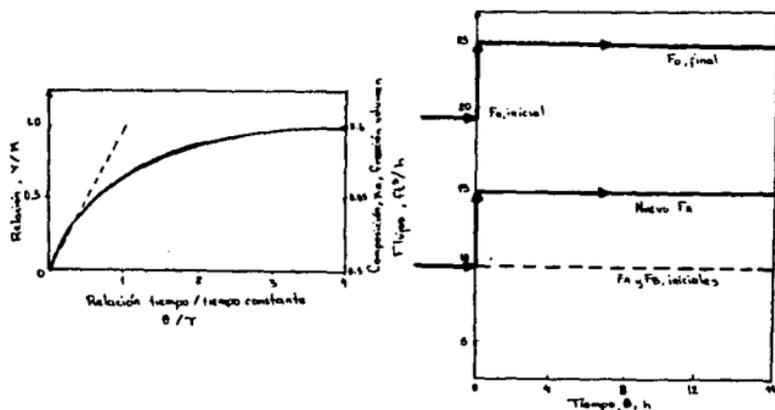


FIG. 2. RESPUESTAS PARA UN SISTEMA DE PRIMER ORDEN.

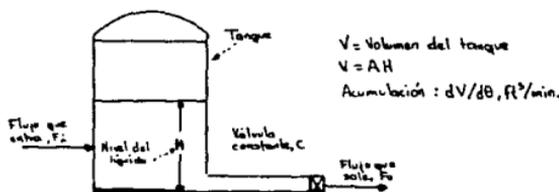


FIG. 3. TANQUE CON NIVEL VARIABLE EN EL TIEMPO.

Otro ejemplo sería como el que se muestra en la fig.3. Al principio $F_i = F_o$ y después de cierto tiempo la válvula se empieza a cerrar, dicho efecto en el flujo de salida, se puede ilustrar mediante la ecuación:

$$F_o = C\sqrt{H} \quad (5)$$

Aplicando la ecuación de conservación de la masa tenemos:

$$F_i - F_o = \frac{dV}{dt} = \frac{dAH}{dt} = \frac{AdH}{dt} \quad (6)$$

y sustituyendo la ecuación (5) en la ecuación (6), nos da:

$$F_i - C/\sqrt{H} = AdH/d\theta \quad (7)$$

Para resolver la ecuación (7) de una manera exacta consideraremos la ecuación (8) y obtenemos:

$$u = \sqrt{H} \quad (8)$$

$$dH = 2u du \quad (9)$$

$$2Au(du/d\theta) = F_i - Cu \quad (10)$$

$$2A \left(\frac{du}{F_i - Cu} \right) = d\theta \quad (11)$$

Si ponemos datos al problema: $C = 10 \text{ ft}^3/\text{min}$; $A = 20 \text{ ft}^2$; $F_i = 10 \text{ ft}^3/\text{min}$ a $\theta = 0$, y $25 \text{ ft}^3/\text{min}$ después de $\theta = 0$; $F_o = 20 \text{ ft}^3/\text{min}$ a $\theta = 0$; $H = (F_o/C)^2 = 4 \text{ ft}$ inicialmente; y $u = \sqrt{H} = 2$ inicialmente.

Resolviendo por integración y sustituyendo datos tenemos:

$$40 \int_{u=2}^{u} \frac{du}{F_i - 10u} = \int_0^{\theta/d} d\theta \quad (12)$$

$$(40/100) [F_i - 10u - F_i \ln(F_i - 10u)]_{u=2}^{u} = \theta \quad (13)$$

$$0.4 [-10(u-2) - F_i \ln \left(\frac{F_i - 10u}{F_i - 20} \right)] = \theta \quad (14)$$

$$\ln \left[\frac{F_i - 10\sqrt{H}}{F_i - 20} \right] = \frac{-2.5\theta}{F_i} - \frac{10}{F_i} [\sqrt{H} - 2] \quad (15)$$

La respuesta de la variación del nivel del tanque con respecto al tiempo se muestra en la fig. 4, cuya solución después de linearizar la ecuación y utilizar las series de Taylor queda expresada como:

$$H = \hat{H} - 2e^{-0.125\theta} \quad (16)$$

La fig. 4 ilustra tanto la solución exacta, ecuación (15), y la aproximada a partir de la ecuación (16).

Como puede observarse el análisis de los sistemas físicos es el paso más importante en cualquier problema relacionado con la dinámica del proceso y si nos apoyamos con las herramientas matemáticas adecuadas, es posible dar solución aproximada a los problemas que se nos presentan.

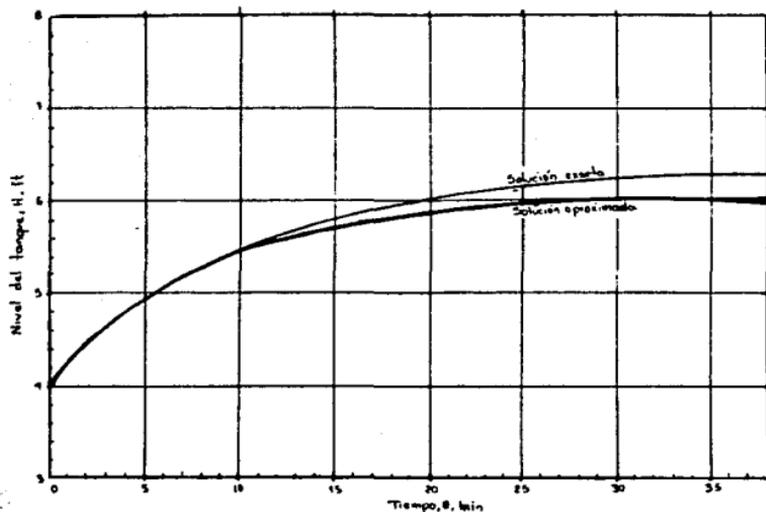


FIG. 4. COMPARACION DE LOS RESULTADOS.

Lazos de control de proceso.

La simulación de los "loops" de control de proceso incluye modelos para:

- Los dispositivos sensibles que miden las variaciones de proceso del sistema.
- Los controladores y las válvulas de control.

En esta sección se mostrará como analizar los diferentes componentes de un loop de control.

Control típico de procesos

Para ilustrar un control típico de proceso consideremos el calentador de agua mostrado en las fig.5 y 6. El loop de control de temperatura, mide esta en el tanque e incrementa el flujo de condensado cuando la temperatura deseeada disminuye. La temperatura requerida en la corriente F_0 se le denomina punto de ajuste (set point) del controlador de temperatura.

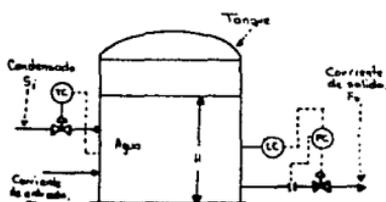


FIG.5. LAZO DE CONTROL PARA UN CALENTADOR DE AGUA.

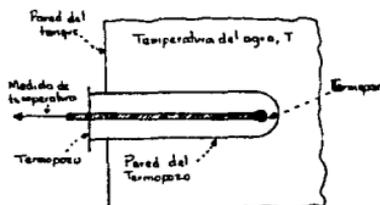


FIG.6. ELEMENTO SENSOR DE TEMPERATURA.

El flujo F_0 controlará el nivel del líquido, H , en el tanque, y en este sistema tenemos especificado un control en cascada del nivel del líquido, dentro de un rango más o menos constante del flujo de salida. Un cambio en el nivel del líquido produce un error en el punto de ajuste del controlador de nivel, LC. El controlador de nivel cambia el punto de ajuste del controlador de flujo, FC y produce un error en la señal que origina que la válvula de control ajuste el flujo F_0 .

Antes de proseguir daremos un vistazo a los elementos para los cuales es necesario desarrollar las ecuaciones dinámicas.

* Sensores de temperatura.

Un elemento sensor de temperatura se muestra en la fig.6 y los elementos para el análisis de este sensor se muestran en la fig.7.

Cuando la temperatura del líquido cambia, la energía se transferirá al termopar y del balance de energía se puede plantear:

Entrada: $hA(T-t)$
 Salidas: c
 Acumulación: $d(M_t C_{pt})/dt$

donde A = al área del termopar o termopozo, C = capacidad calorífica del termopar y termopozo, h = coeficiente de transferencia de calor, M_t = masa del termopar y termopozo, y θ = tiempo.

Considerando que el coeficiente de transferencia de calor H , y las capacidades caloríficas son constantes se tiene:

$$M_t C_{pt} \left(\frac{dt}{d\theta} \right) = hA (T-t) \quad (17)$$

cuya solución es:

$$t = T - e^{-\theta/\tau} \quad (18)$$

En caso de que se considerarán resistencias adicionales en serie como las mostradas en la fig.8 se deberá plantear la solución de la ecuación (19).

$$\left[\frac{M_t C_{pt} M_w C_{pw}}{h_w A_w h A} \right] \frac{d^2 t}{d\theta^2} + \left[\frac{M_t C_{pt}}{h_w A_w} + \frac{M_t C_{pt}}{h A} + \frac{M_w C_{pw}}{h A} \right] \frac{dt}{d\theta} + t = T \quad (19)$$

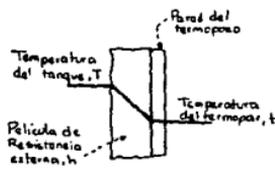
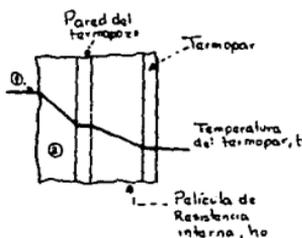


FIG.7. PERFIL DE TEMPERATURA SIN CONSIDERAR RESISTENCIA EC. (17).



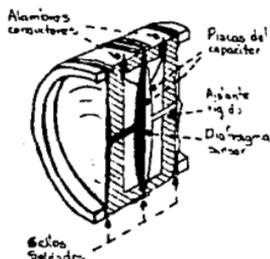
- ① Temperatura del tanque, T
- ② Película de Resistencia externa, h .

FIG.8. PERFIL DE TEMPERATURA CONSIDERANDO LA RESISTENCIA EC. (19).

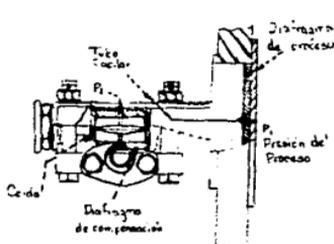
* Sensores de presión.

El nivel del líquido H, en el tanque de la fig. 8, se puede convertir a señal de presión en un elemento como se muestra en la fig. 9. Un cambio en la presión, P_1 , en el proceso, (lo mismo que un cambio de nivel del líquido en el tanque) provocará un cambio en la presión, P_2 , al final del tubo capilar, pero dicho cambio no será instantáneo. Poniendo un balance de fuerzas y usando la ecuación de conservación de momentum, alrededor del tubo capilar obtenemos:

$$P_1 A_c - P_2 A_c = \left(\frac{\rho_c \pi R_c^2}{2} \right) \frac{d^2 Z}{dt^2} \quad (20)$$



a: Celda de Presión Diferencial



b: Sensor de presión

FIG. 9. TRANSMISOR DE PRESIÓN PARA EL NIVEL DE UN LIQUIDO.

El aumento o decremento en la presión origina que se aplique una fuerza en el diafragma de compensación. La resistencia mecánica del diafragma se comportará como un resorte de una resistencia K . La fuerza que actúa sobre el diafragma ($P_2 A_c$), balanceará la fuerza KZ , y la capacitancia C , en el diafragma. Matemáticamente queda:

$$P_2 A_c = KZ + C \left(\frac{dZ}{dt} \right) \quad (21)$$

Combinando las ecuaciones (20) y (21) tenemos:

$$\left(\frac{A_c L_c \rho_c}{2 K} \right) \frac{d^2 Z}{dt^2} + \frac{C dZ}{K dt} + Z = P_1 A_c K \quad (22)$$

Podemos convertir la ecuación (22) a una ecuación general de 2o. orden:

$$T \left(\frac{d^2 Z}{dt^2} \right) + 2\zeta T \left(\frac{dZ}{dt} \right) + Z = G H$$

donde G = ganancia del sistema, T = tiempo constante, y ζ = relación de amortiguamiento.

La ecuación de la ecuación (23) se puede representar en una gráfica como se muestra en la fig. 10.

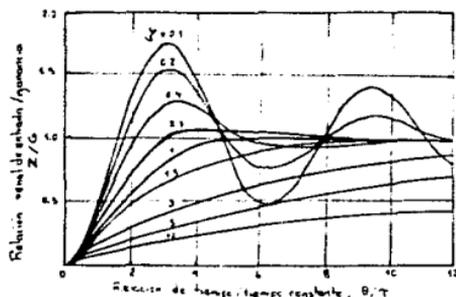


FIG. 10. RESPUESTA DE UN SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN.

† Sensores analíticos de proceso.

Los analizadores de proceso son dispositivos que miden la composición de líquidos y gases. Dependiendo de la aplicación se pueden determinar todos los componentes presentes o sólo algunos de ellos. En la fig. 11 se muestra un diagrama de bloques para un cromatógrafo de gases.

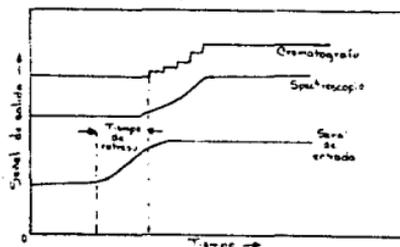


FIG. 11. RESPUESTAS REPRESENTATIVAS DE ANALIZADORES DE PROCESO.

El mayor problema en la aplicación de los datos provenientes de estos dispositivos es la tardanza en el tiempo de respuesta. Las principales causas de esta tardanza son:

- a) Desplazamiento de la muestra de la corriente de proceso a la columna de cromatografía.
- b) Tiempo requerido para viajar en la columna.
- c) Tiempo requerido para detectar la respuesta.

1) Controladores de proceso

Los controladores de proceso se pueden clasificar de la siguiente manera:

- 1) "on-off", ejemplo: termostatos caseros.
- 2) Controladores proporcionales, estos controladores se describen comúnmente con una banda proporcional variable o con una constante de ganancia del controlador. Su relación se puede representar como:

$$PB = 100 / K_c \quad (24)$$

Podemos representar la salida de un controlador proporcional a una señal de entrada mediante:

$$p = K_c e + R = K_c (I - SP) + R \quad (25)$$

donde p = señal de salida, e = error, R = reset manual, SP = punto fijo, e I = señal de entrada.

3) Controlador proporcional-"plus-reset". Su relación matemática se puede expresar como:

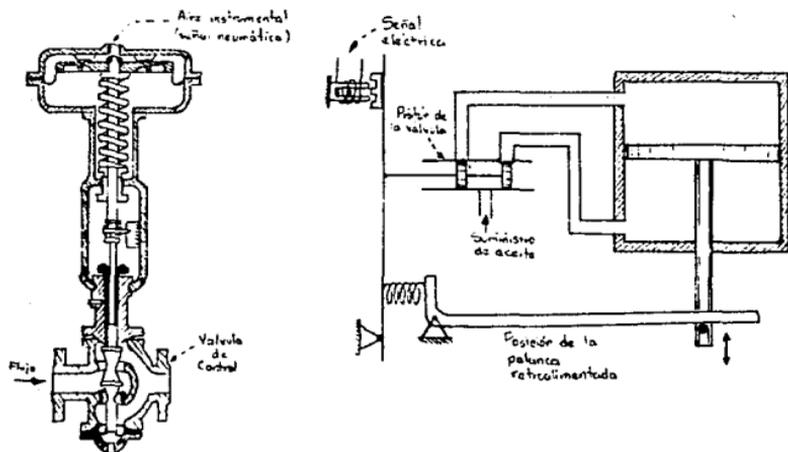
$$p = K_c e + \frac{K_c}{T_i} \int e dt \quad (26)$$

4) Control proporcional-"plus-reset-plus-rate" (PID). En este controlador, se ha adicionado un tercer elemento denominado control derivativo. Este permite una mayor ganancia proporcional para sistemas de orden mayor, ya que anticipará un error, y aplicará una acción de control que es proporcional a la rapidez de dicho cambio. Matemáticamente esto es:

$$p = K_c e + \frac{K_c}{T_i} \int e dt + K_c T_d \left(\frac{de}{dt} \right) \quad (27)$$

• Elementos finales de control.

Normalmente el elemento final de control es una válvula que recibe información de el controlador y ajusta su posición para regular el flujo através de la tubería. Otros elementos finales de control incluyen los relevadores para arrancar o parar equipos. La fig. 12 muestra algunos actuadores típicos.



a- Actuador neumático

FIG. 12. ACTUADORES PARA ELEMENTOS DE CONTROL FINAL.

Si aplicamos un análisis de conservación de momento alrededor de la válvula, obtenemos una ecuación diferencial de 2o. orden cuya expresión es la misma que la ecuación (23):

$$T^2 \left(\frac{d^2 Z}{dt^2} \right) + 2\beta T \left(\frac{dZ}{dt} \right) + Z = GH \quad (23)$$

Las ecuaciones para el flujo através de una válvula de control son:

$$F = AC_v \sqrt{P_1 - P_2} \quad (28)$$

$$F = AC_v \sqrt{(P_1^2 - P_2^2)/2} \quad (29)$$

$$F = 0.601 AC_v P_1 \quad (30)$$

donde A = Fracción de abertura de la válvula, C_v = capacidad de la válvula, F = flujo, F_1 = presión superior, F_2 = presión inferior.

Aplicaciones de las ecuaciones de control.

Si se aplican las ecuaciones de control al equipo mostrado en la fig.5 en forma sistemática, se pueden obtener las ecuaciones diferenciales que se muestran a continuación:

$$F_1 + S_1 - F_0 = P A_v \left(\frac{dH}{dt} \right) \quad (31)$$

$$F_1 C_{p1} + S_1 C_{p1} - F_0 C_{p0} = \rho A_v H \frac{d^2 h}{dt^2} + \rho A_v L_v \left(\frac{dH}{dt} \right) \quad (32)$$

$$T_L \frac{d\theta_{L1}}{dt} = t_0 - \theta_{L1} \quad (33)$$

$$\theta_{L2} = K_{c1} (\theta_{L1} - SP_1) + \frac{K_{c1}}{T_{i1}} \int (\theta_{L1} - SP_1) dt + K_{c1} T_{d1} \frac{d(\theta_{L1} - SP_1)}{dt} \quad (34)$$

$$S_2 = A_L C_{v2} \sqrt{P_{1L} - P_{2L}} \quad (35)$$

$$F_{2L} = g(H) \quad (36)$$

$$T_1^2 \left(\frac{d^2 \theta_{L1}}{dt^2} \right) + 2 Z_1 T_1 \left(\frac{d\theta_{L1}}{dt} \right) + \theta_{L1} = G_1 H \quad (37)$$

$$T_F^2 \left(\frac{d^2 \theta_{F1}}{dt^2} \right) + 2 Z_F T_F \left(\frac{d\theta_{F1}}{dt} \right) + \theta_{F1} = G_F F_0 \quad (38)$$

$$\theta_{L1} = H, \theta_{F1} = F_0 \quad (39)$$

$$\frac{d\theta_{L1}}{dt} = \frac{d\theta_{F1}}{dt} = 0 \quad (40)$$

$$\theta_{L2} = K_{c1} (\theta_{L1} - SP_2) + R \quad (41)$$

$$\theta_{F2} = K_{cF} (\theta_{F1} - \theta_{L2}) + \frac{K_{cF}}{T_{iF}} \int (\theta_{F1} - \theta_{L2}) dt \quad (42)$$

$$F_0 = A_F C_{vF} \sqrt{P_{2F} - P_{2F}} \quad (43)$$

$$P_{2F} = g(H, F_0, C) \quad (44)$$

Solución de los modelos matemáticos para sistemas dinámicos.

A continuación presentamos algunos de los métodos más usuales para resolver las ecuaciones diferenciales que se obtienen en la formulación de modelos matemáticos para procesos químicos.

Conceptos básicos.

Una ecuación diferencial ordinaria de orden "n" es lineal si se puede escribir como:

$$\frac{d^n Y}{d\theta^n} + f_{n-1}(\theta) \frac{d^{n-1} Y}{d\theta^{n-1}} + \dots + f_1(\theta) \frac{dY}{d\theta} + f_0(\theta) Y = X(\theta) \quad (45)$$

La solución general de la ecuación (45) contiene "n" constantes arbitrarias y para ser independiente la solución no se puede reducir a una forma que contenga menos de n constantes.

Método de separación de variables.

Por ejemplo, cuando se tiene la ecuación de destilación de Rayleigh:

$$\frac{dX}{d\theta} = \frac{V(KX - X)}{L_0 - V\theta} \quad (46)$$

donde K es la constante de equilibrio, y es función solo de X; L_0 es la alimentación del líquido al sistema; V la velocidad del vapor, como función del tiempo; X es la variable dependiente; y θ es el tiempo, la variable independiente. Se pueden separar las variables X y θ para obtener:

$$\frac{dX}{X(K-1)} = \frac{-V d\theta}{L_0 - V\theta} \quad (47)$$

si K y V son constantes la solución es:

$$\frac{\ln(X)}{K-1} = \ln(L_0 - V\theta) + I \quad (48)$$

donde I es la constante de integración. Sustituyendo $X=X_0$ para $\theta=0$ la ecuación final es:

$$\frac{1}{K-1} \ln\left(\frac{X}{X_0}\right) = \ln\left(\frac{L_0 - V\theta}{L_0}\right) \quad (49)$$

Método de factor de integración.

Si la variable Y es una función del tiempo θ , la ecuación para un sistema general de 1er. orden se puede escribir como:

$$T \frac{dY}{d\theta} + Y = X(\theta) \quad (50)$$

donde X es la función de fuerza y es función del tiempo; Y es la variable dependiente; T es la constante de tiempo del sistema; y θ es el tiempo, la variable independiente.

Para este sistema no podemos separar las variables directamente, sin embargo, se puede resolver mediante el método de factor integrante. La forma general de tales ecuaciones es:

$$\frac{dY}{d\theta} + f(\theta)Y = X(\theta) \quad (51)$$

La solución para la ecuación (51) está dada por:

$$Y(\theta) = e^{h\theta} \left[\int e^{-h\theta} X(\theta) d\theta + I \right], \quad h = f(\theta) \quad (52)$$

En la fig. 13 se ilustra la respuesta para una ecuación de 1er. orden.

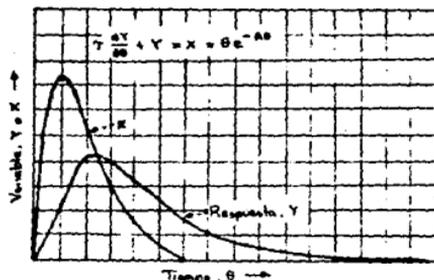


FIG. 13. SISTEMA DE RESPUESTA DE UNA ECUACION DE PRIMER ORDEN.

Ecuaciones de 2o. orden.

Un ejemplo de este tipo de ecuaciones es el que corresponde a los sensores de presión en función de su nivel y se pueden representar como:

$$T^2 \frac{d^2Y}{d\theta^2} + 2\sqrt{T} \frac{dY}{d\theta} + Y = GX$$

donde S es la ganancia del sistema; X es la función de fuerza; Y es la variable dependiente; T es la constante de tiempo del sistema; γ es la relación de amortiguamiento; y U es el tiempo.

- Los pasos a seguir para resolver esta ecuación son:
- Igualar el lado izquierdo a cero y obtener la solución complementaria.
 - Encontrar la solución particular.
 - La solución total es la suma de a) + b)

Por ejemplo, la solución complementaria de la ecuación

(53):

$$T^2 \frac{d^2 Y}{dt^2} + 2\gamma T \frac{dY}{dt} + Y = 0 \quad (54)$$

Resolviendo la ecuación (54):

$$Y = e^{-\gamma t/T} \left[I_1 \cos \frac{\sqrt{\gamma^2 - 1}}{T} t + I_2 \sin \frac{\sqrt{\gamma^2 - 1}}{T} t \right] \quad (55)$$

La solución particular para la ecuación (53), empleando el método de coeficientes indeterminados, puede aplicarse solamente a ecuaciones lineales con coeficientes constantes mediante el siguiente procedimiento:

- Asumiendo un forma de solución particular.
- Realizando las diferenciaciones indicadas e insertando estas respuestas en la ecuación original.
- Resolviendo la ecuación resultante para los valores desconocidos considerando que la forma correcta de la solución particular ha sido seleccionada.

Variación de parámetros.

Otros métodos para obtener la solución particular no están restringidos a ecuaciones lineales que tienen coeficientes constantes por ejemplo, el método de variación de parámetros que contempla el reemplazo de I constantes de integración en la solución complementaria con dos funciones desconocidas de θ .

Transformadas de Laplace.

Convierten una ecuación diferencial ordinaria con el tiempo como variable independiente, en una ecuación equivalente que puede resolverse por métodos puramente algebraicos. La respuesta a la ecuación algebraica es la solución completa del problema, el procedimiento para convertir una función del tiempo a una función de la variable S de transformadas de Laplace de acuerdo con:

$$\mathcal{L}[f(t)] = \int_0^{\infty} e^{-s\theta} f(\theta) d\theta \quad (56)$$

Aplicando la ecuación (50) a la primera y segunda derivada de la función del tiempo obtenemos:

$$\int \left[\frac{df(t)}{dt} \right] = s f(s) - f(0) \quad (57)$$

$$\int \left[\frac{d^2f(t)}{dt^2} \right] = s^2 f(s) - sf'(0) - f'(0) \quad (58)$$

Aplicaciones a control automático.

Por ejemplo, si describimos un sistema de control por una ecuación de 2o orden tal como:

$$A \frac{d^2Y}{dt^2} + B \frac{dY}{dt} + CY = X(t) \quad (59)$$

La podemos transformar al dominio de Laplace como:

$$Y(s) = \frac{X(s)}{(As^2 + Bs + C)} + \frac{(As + B)X(0) + AX'(0)}{(As^2 + Bs + C)} \quad (60)$$

Ecuaciones diferenciales parciales.

En este caso se tiene la aplicación más útil de las transformadas de Laplace. En análisis dinámico el tiempo siempre es una variable, por lo tanto la transformación siempre se puede aplicar a la variable t . Este procedimiento estandarizará nuestros cálculos de tal manera que no desperdiciemos tiempo para analizar el tipo de ecuación; sino que podemos proceder inmediatamente a la solución.

Ejemplo ilustrativo:

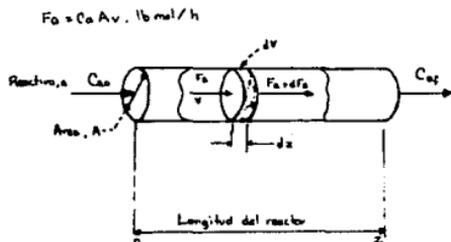


FIG. 14. REACTOR TUBULAR CON FLUJO TAPON.

Si consideramos el reactor tubular mostrado en la fig.14 via una reacción cinética de 1er orden, tenemos:

$$r = \frac{dC_a}{d\theta} = -k C_a \quad (61)$$

Donde C_a es la concentración de reactante, lb-mol/ft³; k es la constante cinética de velocidad, 1/h; r es la velocidad de reacción-mole (m)·ft³; y θ es el tiempo.

Aplicando el balance de materia en la sección diferencial del reactor, tenemos:

Entrada: $C_a A v$

Reacción: $C_a dV = -k C_a dV = -k C_a A dZ$

Salida: $C_a A v + \frac{\partial}{\partial Z}(C_a A v dZ)$

Acumulación: $\frac{\partial(C_a A dZ)}{\partial \theta}$

donde A es el área transversal del reactor, ft²; v es la velocidad de flujo, ft/h; V es el volumen del reactor, ft³; y Z es la longitud del reactor, ft.

Por lo tanto la ecuación diferencial para el balance de materia queda como:

$$\frac{\partial(v C_a)}{\partial Z} + \frac{\partial C_a}{\partial \theta} + k C_a = 0 \quad (62)$$

Si cambia la concentración inicial por alguna razón, aplicando el procedimiento de transformadas de Laplace, se llega a la solución siguiente:

$$C_a(\theta, Z) = C_{a0} e^{-(k/v)Z} \quad (63)$$

$$C_a(\theta, Z) = C_{a1} e^{-(k/v)Z} \quad (64)$$

Si cambia el flujo de alimentación se llega a la siguiente solución:

$$C_a(\theta, Z) = C_{a0} e^{-(k/v)Z} e^{-k[(1-v/v_0)]\theta} \quad (65)$$

$$C_a(qZ) = C_{a0} e^{-(k/v)Z} \quad (66)$$

Las fig.15 y 16 ilustran el perfil de concentraciones de los reactivos y la fig. 17 el perfil de concentración del efluente.

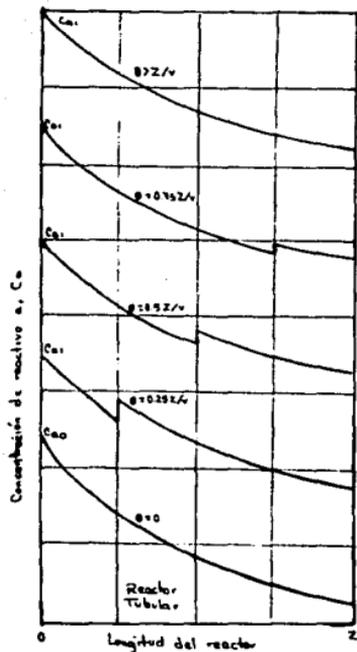


FIG. 15. RESPUESTA AL CAMBIO EN LA CONCENTRACION.

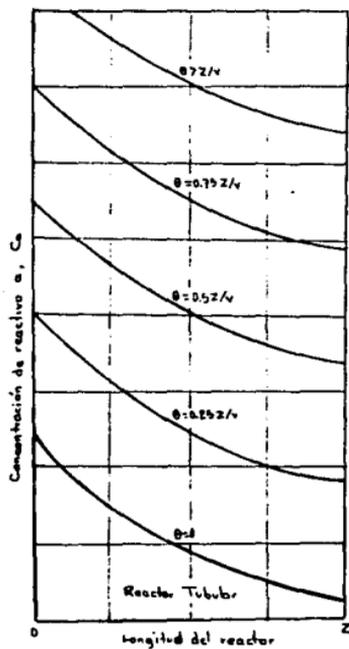


FIG. 16. RESPUESTA AL CAMBIO EN LA VELOCIDAD DE FLUJO.

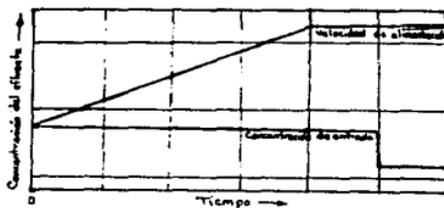


FIG. 17. PERFIL DE CONCENTRACION DEL EFLUENTE.

Modelación de procesos en computadoras analógicas e híbridas.

Para dar solución a los sistemas dinámicos, desde sus inicios se utilizaron las computadoras analógicas y posteriormente los sistemas híbridos.

Computación analógica.

Las computadoras analógicas desarrollan las operaciones matemáticas, usando electricidad con corriente directa; las variables son el voltaje y el tiempo. Las variables para los procesos químicos se pueden representar mediante componentes electrónicos arreglados para simular sistemas complejos. Después de que el problema se ha definido y se intenta resolver en una computadora analógica, el voltaje se mide y el valor del mismo predice el valor de la variable dependiente en un tiempo dado.

Las operaciones básicas que se pueden realizar incluyen sumas, integraciones y generación de funciones. La fig.18 muestra la simbología típica empleada en estos casos y en la fig.19 se muestran los diagramas de circuitos para multiplicar, sumar e integrar y sus relaciones matemáticas.

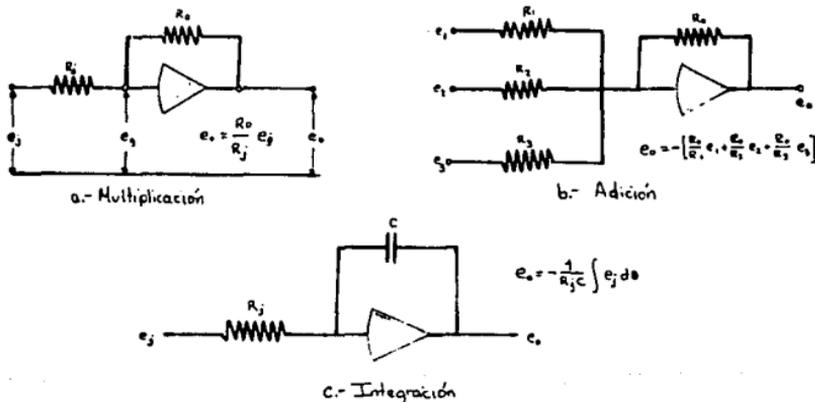


FIG.19. CIRCUITO PARA UNA COMPUTADORA ANALOGICA.

Computación híbrida.

Cuando a las computadoras analógicas se les adicionan facilidades de las computadoras digitales, se les conoce como computadoras híbridas. Estos equipos permiten al usuario extender la capacidad, ya que las computadoras analógicas están limitadas hasta 26 integraciones o 26 ecuaciones diferenciales ordinarias. Para desarrollar los cálculos secuencialmente mediante algoritmos de control digitales, podemos programar la computadora analógica para resolver las 26 ecuaciones diferenciales en forma repetitiva.

Ejemplo ilustrativo.

Para ilustrar lo anterior se considerará un problema de reactor por lotes en un sistema híbrido.

Consideraciones:

A \rightarrow B \rightarrow C donde B es el producto deseado.

$$R_A = dC_A/d\theta = -k_1 C_A \quad (67)$$

$$R_B = dC_B/d\theta = k_1 C_A - k_2 C_B \quad (68)$$

$$R_C = dC_C/d\theta = k_2 C_B \quad (69)$$

$$k_1 = 10^3 \exp(-9,000/T) \quad (70)$$

$$k_2 = 10^3 \exp(-12,000/T) \quad (71)$$

donde C es la concentración del componente A, B o C, lb-mol/ft³; k es la constante cinética de velocidad, min⁻¹; R es la velocidad de reacción del componente A, B o C, lb-mol/(ft³)(min); T es la temperatura, K; y θ es el tiempo, min.

Datos:

Capacidad calorífica, C_p , = 50 Btu/(lb-mol)°F

Densidad, ρ , = 0.5 lb-mol/ft³ (= constante)

Temperatura: 10 a 120°C

Calor de reacción = 25°C $\left\{ \begin{array}{l} \Delta H_1 = -1800 \text{ cal/mol} \\ \Delta H_2 = -1500 \text{ cal/mol} \end{array} \right.$

El reactor tiene una capacidad de 7500 gal disponibles en tres meses. El reactivo A es producido como un subproducto en otros procesos en una cantidad aproximada de 500 lb-mol en este periodo de tiempo. El problema es determinar si el reactor con una capacidad de 7500 gal es el adecuado. La preparación de la mezcla de reacción y limpieza del reactor se estima en 12 h, por lo tanto el tiempo de reacción en este equipo debe limitarse a 12 h.

Los perfiles del reactor obtenidos mediante esta simulación para dos diferentes niveles de temperatura se muestran en la Fig. 20.

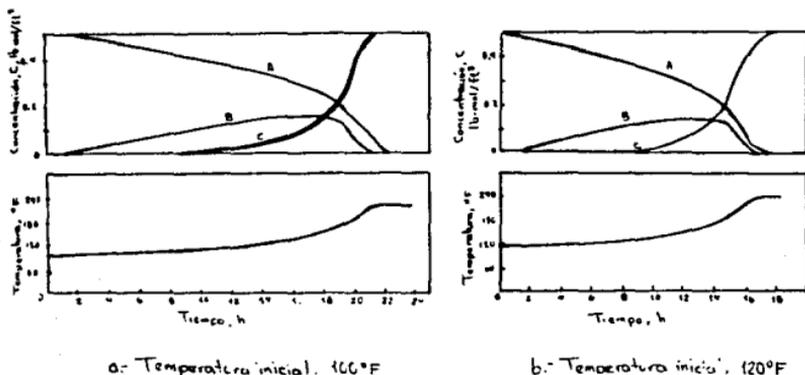


FIG. 20 PERFILES DEL REACTOR EN CONDICIONES ADIABATICAS.

Ventajas y limitaciones.

La integración de ecuaciones diferenciales en sistemas analógicos no es un problema de simulación tan difícil como lo es en digitales. Existe tecnología para hacer los sistemas analógicos tan sencillos como los digitales. Sin embargo, pocos investigadores están desarrollando aplicaciones para los sistemas analógicos debido a las primeras experiencias desafortunadas que se obtuvieron.

Modelando sistemas de proceso via computadoras digitales.

Para resolver todas las ecuaciones que definen un sistema, debemos hacer uso de métodos de integración numérica. Los métodos de integración numérica que se presentan a continuación, requiere que el problema tenga valores conocidos de las variables dependientes a algún tiempo t_0 , que usualmente es igual a cero. Este tipo de problemas es llamado un problema de valor inicial. Predecimos los valores de las variables dependientes que satisfacen la ecuación diferencial a intervalos sucesivos de tiempo, via una o varias técnicas.

* Método de Euler.- La precisión del método de Euler depende en gran medida del tamaño del intervalo (h): cuando el tamaño del intervalo es pequeño, la exactitud del método aumenta. Sin embargo, existe un valor máximo del tamaño del intervalo, donde el método diverge de la solución verdadera, para valores grandes de tiempo. Este valor máximo es de 2.0 para el método de Euler, valores mayores causan que el método sea inestable. Por lo tanto, la región estable para el método de Euler comprende rangos de 0 a 2.0.

* Método de Runge-Kutta de 2o. orden.- Es conocido como el método de Euler modificado. El rango del tamaño del intervalo (h), es de 0 a 2.0 y el error de truncación es del orden de h^3 .

* Método de Runge-Kutta de 4o. orden.- El error de truncación para este método es de h^5 . En este método se incrementa la región de estabilidad para valores de h de 0 a 2.78.

* Método de Adams-Bashforth.- El error de truncación es del orden de h^5 y para obtener la misma exactitud que el método de Runge-Kutta debemos usar valores de h pequeños. El método es estable en rangos de valores pequeños para h . A diferencia de los métodos anteriores, la inestabilidad no aparece después de 1 ó 2 incrementos de tiempo, es decir, se presenta mucho después.

* Método de Adams-Moulton.- Este método es un ejemplo de predicción-corrección, para resolver ecuaciones diferenciales, es decir, es iterativo, ya que se basa en la estimación de un error. La principal desventaja del método es que para calcular las tres primeras aproximaciones es necesario usar otro método.

Tomando el ejemplo del calentador de agua, en la Fig.21. Inicialmente se opera en estado estacionario y las corrientes de alimentación son: $F_1 = 4000$ lb/min de agua a 120°F , $S_1 = 1000$ lb/min de vapor condensado a 220°F . La corriente fría de alimentación, F_1 , disminuye a 118°F .

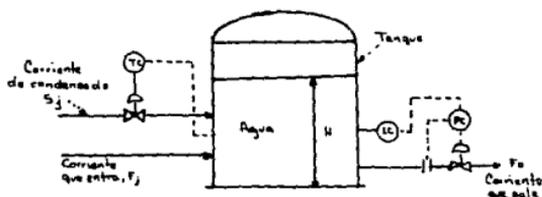


FIG.21 SISTEMA DE CONTROL PARA UN CALENTADOR DE AGUA.

La ecuación que representa el sistema es:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{F_1 + S_1 - F_2}{\rho A} \quad (92)$$

Empleando los métodos anteriores, através de un programa, obtenemos la fig.21a, la cual ilustra las respuestas del sistema de calentamiento de agua en condiciones anormales.

Modelo para sistemas de transferencia de calor.

Las ecuaciones, para sistemas modelo de transferencia de calor en equipos batch o continuos, deben tener en cuenta el intercambio de calor isotérmico o no isotérmico, entre fluidos de proceso y el medio de transferencia de calor.

Recipiente enchaquetado.

El líquido contenido en un tanque enchaquetado se calienta por la condensación de vapor en la chaqueta, como se muestra en la fig.22a. Las relaciones que se desarrollan son válidas para un calentamiento o enfriamiento dentro del tanque.

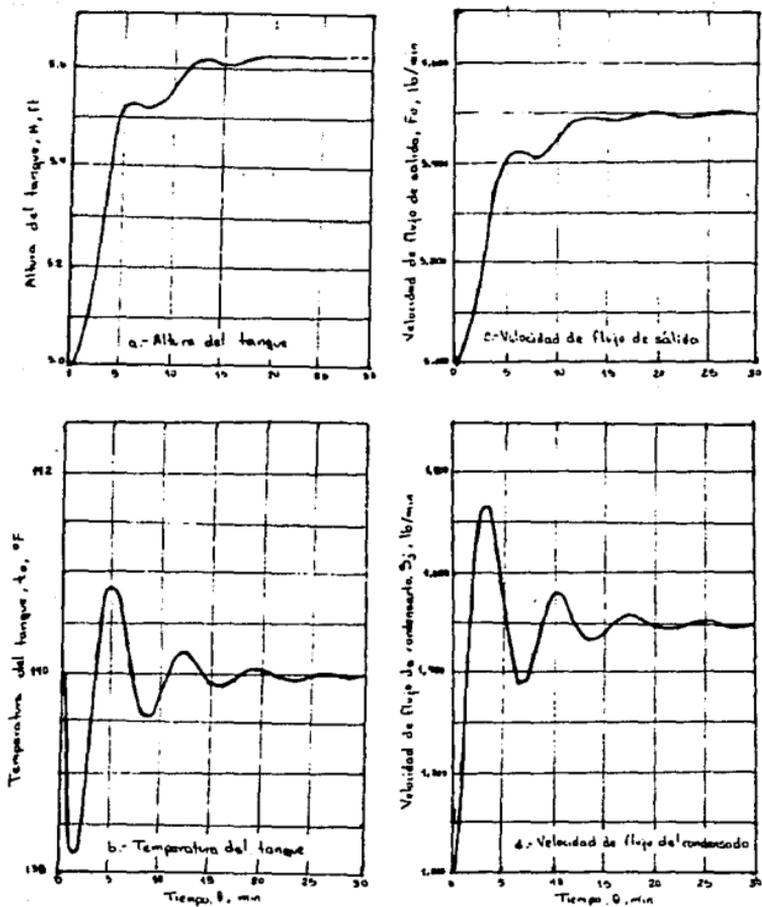


FIG. 21a. SISTEMA DE RESPUESTAS PARA EL CALENTADOR DE AGUA.

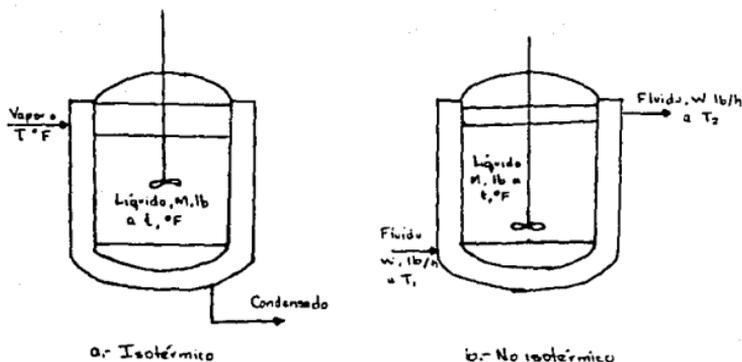


FIG. 22. CALENTAMIENTO O ENFRÍAMIENTO EN UNA VASIJAS ENCHAUQUETADA

Asignemos q (Btu) como la energía transferida por M lb de líquido que tiene una capacidad calorífica, C_p en Btu/(lb)(°F), tenemos:

$$\frac{dq}{d\theta} = MC_p \left(\frac{dt}{d\theta} \right) \quad (73)$$

Para un batch agitado, podemos asumir que la temperatura del tanque varía con el tiempo pero no con la posición. Para un tiempo dado, θ , escribimos:

$$dq/d\theta = UA(T-t) \quad (74)$$

donde U es el coeficiente total de transferencia de calor en Btu/(h)(ft²)(°F); A es el área de transferencia de calor, ft²; T es la temperatura en la chaqueta, °F.

Combinando las ecuaciones (73) y (74) podemos resolver para un tiempo θ el calor del líquido desde t_1 a t_2 :

$$MC_p (dt/d\theta) = UA(T-t) \quad (75)$$

$$\int_0^\theta d\theta = \int_{t_1}^{t_2} \frac{MC_p dt}{UA(T-t)} \quad (76)$$

$$\theta = -\frac{MC_p}{UA} \ln \left[\frac{T-t_2}{T-t_1} \right] \quad \theta = \frac{MC_p}{UA} \ln \left[\frac{T-t_1}{T-t_2} \right] \quad (77)$$

Recipiente encaquetado: medio no isotermico.

El contenido de un recipiente encaquetado es enfriado o calentado por un fluido circulante en la encaqueta (sin cambio de fase), como se muestra en la fig. 22b. Para una velocidad de flujo circulante constante la temperatura de salida, T_2 , varia con el tiempo. Un balance de calor para el liquido batch y el medio de transferencia de calor, produce:

$$dq/d\theta = MC_p \left(\frac{dt}{d\theta} \right) \quad (78)$$

$$dq/d\theta = W_o C_{p_o} (T_2 - T_1) \quad (79)$$

Para una temperatura uniforme, t , en el tanque, podemos escribir:

$$dq/d\theta = UA(LMTD) \quad (80)$$

Podemos eliminar la variable T por la ecuación (79) y (80) y tenemos:

$$T_2 = t + \frac{T_1 - t}{\exp(UA/W_o C_{p_o})} \quad (81)$$

Las ecuaciones (78) y (79), sustituyen la expresion de T_2 de la ecuación (81), integrando y rearrreglando, podemos obtener el tiempo θ , el calor necesario para M lb de liquido de T_1 a T_2 :

$$\theta = \frac{MC_p}{WC_{p_o}} \left[\frac{\exp(UA/WC_{p_o})}{\exp(UA/WC_{p_o}) - 1} \right] \ln \left[\frac{T_1 - t_1}{T_1 - t_2} \right] \quad (82)$$

Cambiador externo: medio isotermico.

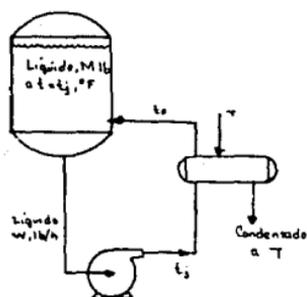
Un liquido en un tanque batch es calentado en un cambiador de calor externo, con un fluido condensado en la coraza del cambiador como se muestra en la fig. 23a. En este caso tenemos además estas variables: la circulación del fluido que va a calentarse, W_1 , en lb/m y t_1 y t_2 , que son las temperaturas de entrada y salida al cambiador. La variable t_1 es también la temperatura en el tanque.

Empezamos con un balance de calor, eliminamos la variable t , integrando la ecuación resultante y rearrreglando para resolver el tiempo θ . Los resultados son:

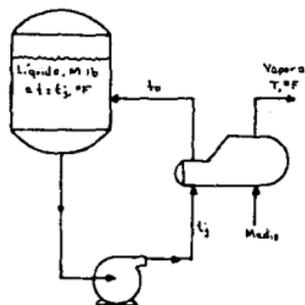
$$\left. \begin{aligned} dq/d\theta &= MC_p \frac{dt}{d\theta} = W_1 C_{p1} (t_1 - t_2) \\ dq/d\theta &= U A (LMTD) \end{aligned} \right\} \quad (83)$$

$$t_0 = T - \frac{(T - t_2)}{\exp(UA/W_1 C_{p1})} \quad (84)$$

$$\theta = \frac{M}{W_1} \left[\frac{\exp(UA/W_1 C_{p1})}{\exp(UA/W_1 C_{p1}) - 1} \right] \ln \left[\frac{T - t_1}{T - t_2} \right] \quad (85)$$



a.- Calentamiento batch



b.- Generación de vapor.

FIG. 25. CALENTAMIENTO O ENFRÍAMIENTO ISOTERMICO CON CALENTAMIENTO EXTERNO.

Cambiadorexternos: medio no isoteramico

Consideremos dos situaciones: a) arreglo a contracorriente, b) de pasos múltiples.

a) Arreglo a contra corriente. - El equipo y su arreglo se muestran en la Fig. 24a. Las ecuaciones para el modelo del sistema son las siguientes, donde las temperaturas de salida, t_1 , t_2 , se calculan por medio y error de las ecuaciones (87) y (88):

$$dq/d\theta = UA \left[\frac{(T_2 - t_2) - (T_1 - t_1)}{\ln[(T_2 - t_2)/(T_1 - t_1)]} \right] \quad (86)$$

$$\frac{W_1 C_{p1}}{UA} (t_1 - t_2) = \frac{(T_2 - t_2) - (T_1 - t_1)}{\ln[(T_2 - t_2)/(T_1 - t_1)]} \quad (87)$$

$$T_2 = T_1 - \frac{W_1 C_{p1}}{W_2 C_{p2}} (t_1 - t_2) \quad (88)$$

$$\theta = \frac{M}{W_1 W_2 C_{p2}} \times \frac{W_2 C_{p2} \left\{ \exp \left[UA \left(\frac{1}{W_1 C_{p1}} - \frac{1}{W_2 C_{p2}} \right) \right] - W_2 C_{p2} \times \ln \left[\frac{(T_1 - t_1)}{(T_1 - t_2)} \right] \right\}}{\ln \left\{ UA \left[\left(\frac{1}{W_1 C_{p1}} \right) - \left(\frac{1}{W_2 C_{p2}} \right) \right] \right\} - 1} \quad (89)$$

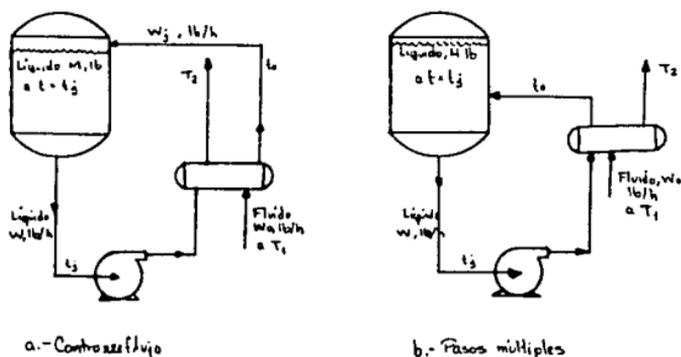


FIG. 24 CALENTAMIENTO NO ISOTERMICO.

b) Cambiador de fases múltiples.-El equipo y su arreglo se muestran en la fig. 24b. Debemos agregar un factor de corrección de temperatura \$F\$ para nuestros cálculos. El procedimiento para calcular \$\theta\$, es el siguiente:

$$\left. \begin{aligned} dq/d\theta &= M C_{p1} \frac{dt}{d\theta} = W_1 C_{p1} (t_1 - t_2) = W_2 C_{p2} (T_1 - T_2) \\ dq/d\theta &= UAF \left[\frac{(T_2 - t_2) - (T_1 - t_1)}{\ln \left(\frac{T_2 - t_2}{T_1 - t_1} \right)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (90)$$

$$R = W_1 C_{p1} / W_2 C_{p2} \quad (91)$$

$$K = 2RF \left[\frac{UA}{W_1 C_{p1}} \sqrt{R^2 + 1} \right] \quad (92)$$

$$S = \frac{2(M-1)}{K(R+1 + \sqrt{R^2+1}) - (R+1 - \sqrt{R^2+1})} \quad (93)$$

$$F = \frac{\sqrt{R^2+1} \ln \left(\frac{1-S}{1-RS} \right)}{(R-1) \ln \left\{ \frac{2-5[(R+1) - \sqrt{R^2+1}]}{2-5[(R+1) + \sqrt{R^2+1}]} \right\}} \quad (94)$$

$$\theta = \frac{M}{S W_1} \ln \left(\frac{T_1 - t_1}{T_1 - t_2} \right) \quad (95)$$

Procesos de transferencia de calor continuo.

Haciendo un balance de energía, para el sistema mostrado en la fig. 25, obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$\text{Para los tubos: } \frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{12 h_i}{\rho_i d_i C_p} (T_w - t) - U_i \frac{\partial T}{\partial y}$$

Para la coraza:

$$\frac{\partial T_w}{\partial \theta} = \left(\frac{12 h_{e,d}}{\rho_w (d_o^2 - d_i^2) C_{p,w}} \right) (T - T_w) - \left(\frac{12 h_{e,d,i}}{\rho_w (d_o^2 - d_i^2) C_{p,w}} \right) (T_w - t)$$

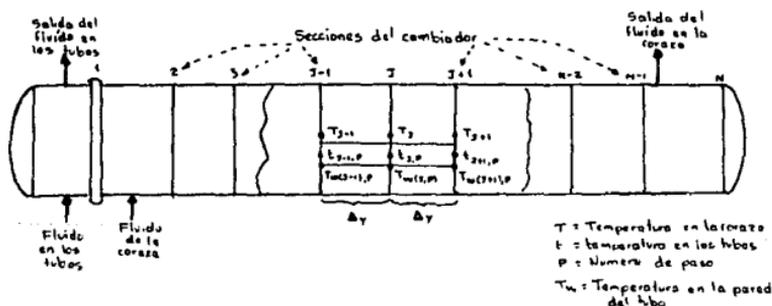


FIG. 25. CAMBIADOR DE CALOR DE MULTIFASOS CON FLUJO PARALELO

Basándonos en estas ecuaciones y dependiendo de las condiciones de servicio, podemos establecer las siguientes ecuaciones:

- Del lado de los tubos: Calor sensible (no hay cambio de fase):

$$\frac{\pi}{4} \rho_i d_i^2 C_p \frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{h_i \pi d_i}{12} (T_w - t) - \rho_i v_i \frac{\pi d_i^2}{144} C_p \frac{\partial T}{\partial Y} \quad (96)$$

- Del lado de los tubos: Condensación isotérmica o evaporación:

$$-\lambda \frac{dY}{dY} + h_i \frac{\pi d_i}{12} (T_w - t) = 0 \quad (97)$$

- Del lado de la coraza: Calor sensible (no hay cambio de fase):

$$\rho_o A_o C_{p_o} \frac{\partial T}{\partial \theta} = -\rho_o v_o A_o C_{p_o} \frac{\partial T}{\partial Y} - \frac{h_o \pi d_o}{12} (T - T_w) \quad (98)$$

- Del lado de la coraza: Condensación isotérmica o evaporación:

$$\lambda \frac{dY}{dY} + h_o \frac{\pi d_o}{12} (T - T_w) = 0 \quad (99)$$

- Fares de los tubos:

$$\rho_w \frac{(d_o^2 - d_i^2)}{4 \times 144} C_{p_w} \frac{dT_w}{d\theta} = \frac{h_o d_o}{12} (T - T_w) - \frac{h_i d_i}{12} (T_w - t) \quad (100)$$

Tomamos la convención de que el calor va del lado de la coraza hacia los tubos, también suponemos un flujo paralelo en la coraza del cambiador, y no tomamos en cuenta los baffles.

La ecuación para calcular el balance de calor através de un segmento diferencial de la pared de los tubos es:

$$\frac{dT_w}{d\theta} = \frac{k_w}{C_{p_w} \rho_w} \left[\frac{\partial^2 T_w}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_w}{\partial R} \right] \quad (101)$$

Los coeficientes de composición son dados por:

$$h_i = \left[\frac{1}{h_i} + R_{d_i} + \frac{d_i (d_o - d_i)}{12 k_w (d_o + d_i)} \right]^{-1} \quad (102)$$

$$h_o = \left[\frac{1}{h_o} + R_{d_o} + \frac{d_o (d_o - d_i)}{12 k_w (d_o + d_i)} \right]^{-1} \quad (103)$$

Para el cambiador que se muestra en la fig. 25, tenemos N secciones. para cada sección escribimos el equivalente de las ecuaciones (96) y (100). Por conveniencia en la escritura, usamos la siguiente notación:

$$\begin{aligned}
 A_i &= (\pi d_i^2 / 4 \times 144) \rho_i C_{p_i} \\
 B_i &= h_i \pi d_i / 12 \\
 C_i &= (\rho_i v_i \pi d_i^2 / 4 \times 144) C_{p_i} \\
 P &= \text{paso, o número de paso en los tubos.} \\
 \frac{dT_{j,p}}{d\theta} &= \frac{B_i(T_{w(i,p)} - t_{j,p})}{A_i} + \frac{(1-i)^n C_i}{A_i} \left[\frac{t_{2,i,p} - t_{1,i,p}}{2\Delta Y} \right] \\
 \frac{dt_i}{dY} &= \frac{h_i \pi d_i}{12 \lambda} (T_{w(i,p)} - t_{j,p}) \\
 \frac{dT_j}{d\theta} &= \sum_{p=1}^{N_{p1}} \left\{ \frac{B_o}{A_o} [T_j - T_{w(i,p)}] n \right\} + \frac{C_o}{A_o} \left[\frac{T_{j+1} - T_{j-1}}{2\Delta Y} \right]
 \end{aligned}$$

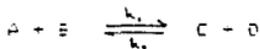
donde N_{p1} es el número de pasos del tubo en la coraza, n es el número de tubos por paso y:

$$\begin{aligned}
 A_o &= \rho_o A_o C_{p_o} \\
 B_o &= -(h_o \pi d_o / 12) \\
 C_o &= -\rho_o v_o A_o C_{p_o} \\
 \frac{dT_{w(i,p)}}{d\theta} &= \frac{B_w}{A_w} (T_j - T_{w(i,p)}) - \frac{C_w}{A_w} (T_{w(i,p)} - t_{(i,p)}) \\
 A_w &= [\rho_w C_{p_w} (d_o^2 - d_i^2)] / 4 \times 144 \\
 B_w &= h_w d_o / 12 \\
 C_w &= h_i d_i / 12
 \end{aligned}$$

Modelo dinámico de sistemas de reactor tipo tanque.

El análisis paso a paso para reactores tipo tanque, su control y sistema de flujo, y la cinética asociada de la reacción, nos muestra como desarrollar un modelo matemático para representar el proceso.

Tomando como ejemplo la reacción de esterificación de un ácido y un alcohol, la cual progresa de acuerdo a la reacción:



La cinética de la reacción esta dada por:

$$R = k_1 C_A C_B - k_2 C_C C_D \quad (104)$$

y la constante de equilibrio, K_e ; para la reacción:

$$K_e = k_1 / k_2 \quad (105)$$

Combinando las ecuaciones (104) y (105) eliminamos la constante k_2 , y obtenemos:

$$R = k_1 \left[C_A C_B - \frac{C_C C_D}{K_e} \right] \quad (106)$$

En base a la termodinámica podemos expresar la constante de equilibrio, K_e , en función de la temperatura y también de k_1 . Haciendo un balance de materia para cada componente obtenemos:

$$F_A - RV = F_0 X_A + \frac{d(V\rho X_A)}{dt} \quad (107)$$

$$F_B - RV = F_0 X_B + \frac{d(V\rho X_B)}{dt} \quad (108)$$

$$RV = F_0 X_C + \frac{d(V\rho X_C)}{dt} \quad (109)$$

$$RV = F_0 X_D + \frac{d(V\rho X_D)}{dt} \quad (110)$$

La fig.26 muestra un esquema de control posible.

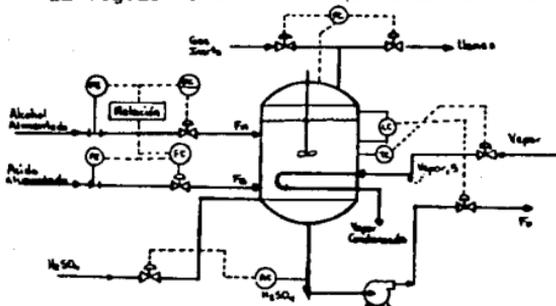


FIG.26. ESQUEMA DE CONTROL PARA UN SISTEMA DE REACTOR TIPO TANQUE

Si cambiamos la expresión para la velocidad cinética de una función de concentración x , moles de componente/ ft^3 , a fracción mol, x , obtenemos:

$$R = \frac{k_1}{P_0^2} \left[x_0 x_B - \frac{x_0 x_B}{K_e} \right] \quad (111)$$

Pasando a lo que sucede en el cambiador de calor, podemos simplificarlo si suponemos condiciones isotérmicas en ambos lados del cambiador y que la temperatura del fluido no varía con la posición.

Las ecuaciones para el balance de energía para la condensación del vapor del lado de los tubos, en la pared de los tubos y la mezcla de reacción son:

$$-\lambda S + h_i A_2 (T_w - t) = 0 \quad (112)$$

$$\frac{n\pi}{4} \left[\frac{(d_0^2 - d_1^2)}{144} \right] L \rho_w c_{pw} \frac{dT_w}{d\theta} = h_o A_o (T - T_w) - h_i A_2 (T_w - t) \quad (113)$$

$$F_A H_A + F_B H_B + h_o A_o (T_w - T) - R \Delta H_r = F_o H_o + \frac{d(PV C_p T)}{d\theta} \quad (114)$$

Simulación de lazos de control.

Para cada lazo de control, podemos escribir la ecuación diferencial para el elemento sensor, el controlador y la válvula de control, como se analizó anteriormente.

* Control de nivel.- Para el sistema de control de nivel con un controlador proporcional integral tenemos:

$$T_1^2 \frac{d^2 \phi_1}{d\theta^2} + 2T_1 T_2 \frac{d\phi_1}{d\theta} + \phi_1 = G_1 H_T \quad (115)$$

$$\phi_{12} = \frac{K_{c1}(AXN)_1}{(SPAN)_1} [\phi_1 - (SP)_1] + \frac{K_{i1}(AXN)_1}{(SPAN)_1} \int \frac{[\phi_1 - (SP)_1] d\theta}{T_{i1}} \quad (116)$$

$$d\phi_{12} / d\theta = \frac{K_{c1}(AXN)_1}{(SPAN)_1} \left[\frac{d\phi_1}{d\theta} + \frac{\phi_1 - (SP)_1}{T_{i1}} \right] \quad (116a)$$

$$F_o = \phi_{12} C_{v1} \sqrt{P_{11} - P_{21}} \quad (117)$$

(AXN) Acción del controlador
 (SPAN) Controlador (su alcance)
 ϕ Señal para el controlador
 dada al elemento sensor.

G ganancia del elemento
 H_1 nivel del líquido en el reactor
 S velocidad del vapor
 T tiempo constante del elemento
 sensor.

donde el subíndice, l , representa el sistema de control de nivel.

* Control de temperatura.-Para el lazo de control de temperatura con un controlador proporcional-integral-derivativo (PID), tenemos:

$$T_T \frac{d\phi_T}{d\theta} + \phi_T = G_T T \quad (118)$$

$$\frac{d^2\phi_T}{d\theta^2} = \frac{1}{T_c} \left[G_T \frac{dT}{d\theta} - \frac{d\phi_T}{d\theta} \right] \quad (118 a)$$

$$\phi_{Tz} = \frac{K_{cT}(A_{KN})_T}{(S_{PAN})_T} \left\{ [\phi_T - (SP)_T] + \frac{1}{T_{i,T}} \int [\phi_T - (SP)_T] d\theta + T_d \frac{d[\phi_T - (SP)_T]}{d\theta} \right\} \quad (119)$$

$$\frac{d\phi_{Tz}}{d\theta} = \frac{K_{cT}(A_{KN})_T}{(S_{PAN})_T} \left\{ \frac{d\phi_T}{d\theta} + \frac{1}{T_{i,T}} [\phi_T - (SP)_T] + T_d \frac{d^2\phi_T}{d\theta^2} \right\} \quad (119 a)$$

$$S = \phi_{Tz} C_{VT} \sqrt{[(P_1T)^2 - (P_2T)^2]}/2 \quad (120)$$

$$\ln P_2 = A' + \frac{B'}{t+C'} \quad (121)$$

La última ecuación relaciona la temperatura del vapor condensado a la presión de operación, a través de la ecuación de Antoine, donde A' , B' y C' son los coeficientes de Antoine.

* Las ecuaciones para la velocidad de flujo del reactivo son las siguientes:

$$T_{FA}^2 \frac{d^2\phi_{FA}}{d\theta^2} + 2\beta_{FA} T_{FA} \frac{d\phi_{FA}}{d\theta} + \phi_{FA} = G_{FA} F_A \quad (122)$$

$$\phi_{FA}^1 = d\phi_{FA}/d\theta \quad (122 a)$$

$$T_{FA}^2 [d\phi_{FA}^1/d\theta] + 2\beta_{FA} T_{FA} \phi_{FA}^1 + \phi_{FA} = G_{FA} F_A \quad (122 b)$$

$$\phi_{FA2} = \frac{(K_c)_{FA}(A_{KN})_{FA}}{(S_{PAN})_{FA}} \left\{ [\phi_{FA} - (SP)_{FA}] + \int \frac{[\phi_{FA} - (SP)_{FA}] d\theta}{(T_i)_{FA}} \right\} \quad (123)$$

$$\frac{d\phi_{FA2}}{d\theta} = \frac{(K_c)_{FA}(A_{KN})_{FA}}{(S_{PAN})_{FA}} \left\{ \frac{d\phi_{FA}}{d\theta} + \frac{1}{(T_i)_{FA}} [\phi_{FA} - (SP)_{FA}] \right\} \quad (123 a)$$

$$F_A = \phi_{FA2} C_{VFA} \sqrt{(P_1)_{FA} - (P_2)_{FA}} \quad (124)$$

$$T_{FB}^2 \frac{d^2\phi_{FB}}{d\theta^2} + 2\beta_{FB} T_{FB} \frac{d\phi_{FB}}{d\theta} + \phi_{FB} = G_{FB} F_B \quad (125)$$

$$T_{FB}^2 \frac{d\phi_{FB}^1}{d\theta} + 2\beta_{FB} T_{FB} \phi_{FB}^1 + \phi_{FB} = G_{FB} F_B \quad (125 a)$$

$$(SP)_{FB} = \phi_{FA} \times (\text{Relación}) \quad (126)$$

$$\phi_{FB2} = \frac{(K_c)_{FB} (A_{KN})_{FB}}{(S_{PAN})_{FB}} \left\{ [\phi_{FB} - (SP)_{FB}] + \frac{1}{T_{iFB}} \int [\phi_{FB} - (SP)_{FB}] d\theta \right\} \quad (127)$$

$$d\phi_{FB2}/d\theta = \frac{(K_c)_{FB} (A_{KN})_{FB}}{(S_{PAN})_{FB}} \left[\frac{d\phi_{FB}}{d\theta} - (\text{Relación}) \frac{d\phi_{FB}}{d\theta} + \frac{\phi_{FB} - \phi_{FB}(\text{Relación})}{T_{iFB}} \right] \quad (127 a)$$

$$F_B = \phi_{FB2} C_{VFB} \sqrt{(P_1)_{FB} - (P_2)_{FB}} \quad (128)$$

Todas estas ecuaciones podemos programarlas, como se mostró anteriormente. Las condiciones iniciales pueden obtenerse fijando el término de acumulación en cero. Puede hacerse más simple el procedimiento de cálculo si suponemos que la respuesta que se transfiere es de 2o. orden en comparación con las constantes de tiempo del sistema, y suponiendo que la medición del sistema y la señal del instrumento son iguales, todo esto elimina tres ecuaciones diferenciales.

Modelación dinámica de sistemas de reactor tubular.

Estudiaremos la deshidrogenación catalítica del etilbenceno a estireno vía una reacción en fase vapor en un reactor tubular. El calor de reacción es proporcionado por un fluido de transferencia de calor. El diagrama de flujo para el sistema y sus controles se muestran en la fig.27.

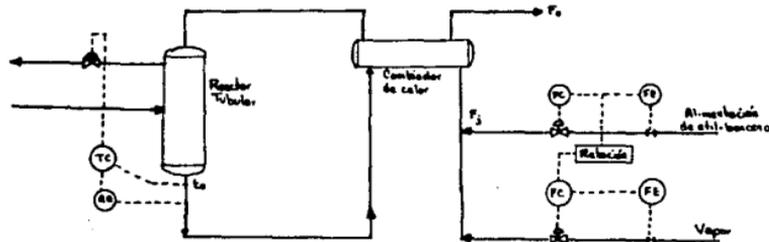


FIG.27. REACTOR Y SISTEMA DE CONTROL.

La velocidad de reacción, R , está dada por:

$$R = k \left[P_e - \frac{P_s P_p}{K} \right] \quad (129)$$

$$k = 12,600 \exp[-10,000/(t+273)] \quad (150)$$

$$K = 0.027 \exp[0.02t(t-500)] \quad (151)$$

donde P_e es la presión parcial de etilbenceno, P_s presión parcial de estireno, P_h presión parcial del hidrógeno, y t es la temperatura en $^{\circ}\text{C}$.

Si despreciamos los gradientes radiales en el reactor, podemos relacionar la conversión, x , con la fracción mol del etilbenceno, Y_e , en el reactor como:

$$Y_e = \frac{1-x}{1+x+S} \quad x = \frac{1-Y_e-SY_e}{1+Y_e} \quad (152)$$

donde $S =$ mol de vapor / mol de etilbenceno.

Un balance de materia para una longitud diferencial, Z , de reactor da:

$$\left(\frac{F}{n}\right)Y_e - \frac{R\pi(d_i)^2 \Delta Z}{4 \times 144} - \frac{1}{n} [F Y_e + \frac{\partial F Y_e}{\partial Z} \Delta Z] = \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\left(\frac{\rho \pi (d_i)^2}{4 \times 144} \right) \Delta Z Y_e \right] \quad (153)$$

$$-\frac{1}{n} \left[\frac{\partial F Y_e}{\partial Z} \right] - \frac{R\pi(d_i)^2}{4 \times 144} = \frac{\partial}{\partial \theta} [\rho Y_e] \frac{\pi (d_i)^2}{4 \times 144} \quad (153a)$$

Las ecuaciones para el flujo molar, F , y densidad, ρ , de la mezcla de reacción como una función de la conversión, x , están dadas por:

$$F = F_i (S + 1 + x) \quad (154)$$

$$\rho = \frac{1.8 P}{R_g (t+273)} \left[\frac{(S+1+x)}{(S+1)} \right] \quad (155)$$

La ecuación cinética, ecuación (129) como una función de la conversión, x , es:

$$R = k \left\{ \frac{(1-x)}{(1+x+S)} - \frac{1}{K} \left[\frac{x^2}{(1+x+S)} \right] \right\} P P_e \quad (156)$$

Relaciones del balance de energía.

Derivamos la ecuación para una sección diferencial, Z , de reactor para un balance de energía, como sigue:

$$\begin{aligned} \frac{F C_{pt}}{n} - R \Delta H_a \left[\frac{\pi (d_i)^2 \Delta Z}{4 \times 144} \right] - \frac{1}{n} [F C_{pt} + \frac{\partial (F C_{pt})}{\partial Z} \Delta Z] + \frac{h_i \pi d_i}{12} \Delta Z (T_w - t) \\ = \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{\rho \pi (d_i)^2}{4 \times 144} \Delta Z C_{pt} \right] \quad (157) \end{aligned}$$

Las ecuaciones para la pared del tubo y el lado de la coraza por el balance de energía son:

$$\rho_0 A_0 C_{p0} \frac{\partial T}{\partial \theta} = -\rho_0 v_0 A_0 C_{p0} \frac{\partial T}{\partial Z} - nh_0 \frac{\pi d_0}{12} (T - T_w) \quad (138)$$

$$\frac{\rho_w [(d_0)^2 - (d_i)^2]}{4 \times 144} C_{pw} \frac{\partial T_w}{\partial \theta} = \frac{h_0 d_0}{12} (T - T_w) - \frac{h_i d_i}{12} (T_w - t) \quad (139)$$

Las ecuaciones para modelar el balance de energía en el precalentador son:

$$\left(\frac{\pi \rho_w (d_i)^2 C_{pw}}{4 \times 144} \right) \frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{h_i \pi d_i}{12} (T_w - t) - \left(\frac{\rho_0 v_0 \pi (d_0)^2 C_{p0}}{4 \times 144} \right) \frac{\partial t}{\partial Z} \quad (140)$$

$$\left(\frac{\rho_w [(d_0)^2 - (d_i)^2] C_{pw}}{4 \times 144} \right) \frac{dT_w}{d\theta} = \frac{h_0 d_0 (T - T_w)}{12} - \frac{h_i d_i (T_w - t)}{12} \quad (141)$$

$$(\rho_0 A_0 C_{p0}) \frac{\partial T}{\partial \theta} = -(\rho_0 A_0 C_{p0}) \frac{\partial T}{\partial Z} - \frac{nh_0 \pi (T - T_w)}{12} \quad (142)$$

Para la solución del estado estacionario, usamos técnicas de integración numéricas. Las variables independientes Z_1 y Z_2 , en vez de un tiempo θ . La solución del estado estacionario de las condiciones iniciales para cada punto en el intercambiador.

Simulación de los lazos de control

Los lazos de control para este sistema se muestran en la fig. 36. Aquí, encontramos que la entrada de etilbenceno y vapor están bajo control de flujo y control de velocidad. El analizador de la composición de producto que abandona el reactor, ajusta el flujo de fluido de calentamiento. Escribamos las ecuaciones (diferenciales y algebraicas) para modelar cada lazo de control en este proceso.

* Lazo de control de flujo del etilbenceno.

$$T_e \frac{d^2 \phi_e}{d\theta^2} + 2 T_e \frac{d\phi_e}{d\theta} + \phi_e = G_e F_e \quad (143)$$

$$\phi_{ez} = \frac{K_{cc} / \Delta H}{(S P H H)_e} [\phi_e - (S P)_e] + \frac{1}{T_e} \int [\phi_e - (S P)_e] d\theta \quad (144)$$

$$F_e = \phi_{ez} C_{ve} \sqrt{[(P_{1e})^2 - (P_{2e})^2] / 2} \quad (145)$$

• Lazo de control de flujo de vapor

$$T_2^2 \frac{d^2 \phi_2}{d\theta^2} + 2 \int_0^2 T_2 \frac{d\phi_2}{d\theta} + \phi_2 = G_2 F_2 \quad (146)$$

$$T_3^2 \frac{d^2 \phi_3}{d\theta^2} + 2 \int_0^3 T_3 \phi_3 + \phi_3 = G_3 F_3 \quad (146a)$$

$$\phi_{2z} = \frac{K_{c2}(AXN)_2}{(SPAN)_2} \times \left\{ \left[\frac{\phi_2}{\phi_e} - (SP)_2 \right] + \frac{1}{T_{20}} \int \left[\frac{d\phi_2}{d\theta} - (SP)_2 \right] d\theta \right\} \quad (147)$$

$$\frac{d\phi_{2z}}{d\theta} = \frac{K_{c2}(AXN)_2}{(SPAN)_2} \times \left\{ \left[\frac{1}{\phi_e} \phi_e \frac{d\phi_2}{d\theta} - \phi_2 \frac{d\phi_e}{d\theta} \right] + \frac{1}{T_{20}} \left[\frac{d\phi_2}{d\theta} - (SP)_2 \right] \right\} \quad (147a)$$

$$S = F_{1z} \phi_{1z} C_{vz} \sqrt{[(P_{1z})^2 - (P_{2z})^2] / 2} \quad (148)$$

• Lazo de control analizador de temperatura

$$\phi_A(\theta) = Y_e(\theta - \lambda) \quad (149)$$

donde λ es el retraso del analizador típicamente de 30 a 70 segundos, para un cromatógrafo de gases.

$$\phi_{Az} = \frac{K_{cA}(AXN)_A}{(SPAN)_A} \times \left\{ [\phi_A - (SP)_A] + \frac{1}{T_{1A}} \int [\phi_A - (SP)_A] d\theta \right\} \quad (150)$$

$$\frac{d\phi_{Az}}{d\theta} = \frac{K_{cA}(AXN)_A}{(SPAN)_A} \left\{ \frac{d\phi_A}{d\theta} + \frac{1}{T_{1A}} [\phi_A - (SP)_A] \right\} \quad (150a)$$

$$T \frac{d^2 \phi_A}{d\theta^2} + \phi_A = G_A t_0 \quad (151)$$

$$\frac{d^2 \phi_A}{d\theta^2} = \frac{1}{T_e} \left[\left(\frac{d\phi_A}{d\theta} \right) G_{10} - \frac{d\phi_A}{d\theta} \right] \quad (151a)$$

$$\phi_{1z} = \frac{K_{c1}(AXN)_1}{(SPAN)_1} \left\{ [\phi_1 - \phi_A] + \frac{1}{T_{11}} \int (\phi_1 - \phi_A) d\theta + T_{01} \left(\frac{d(\phi_1 - \phi_A)}{d\theta} \right) \right\} \quad (152)$$

$$\frac{d\phi_{1z}}{d\theta} = \frac{K_{c1}(AXN)_1}{(SPAN)_1} \left[\frac{d\phi_1}{d\theta} - \frac{d\phi_A}{d\theta} + \frac{1}{T_{11}} (\phi_1 - \phi_A) + T_{01} \left(\frac{d^2 \phi_1}{d\theta^2} \right) \right] \quad (152a)$$

$$W_0 = \phi_{1z} C_{vz} \sqrt{[(P_{1z})^2 - (P_{2z})^2] / 2} \quad (153)$$

Solución de los modelos matemáticos.

La solución de las ecuaciones para este sistema de control y del precalentador ya han sido explicadas anteriormente. Sin embargo, para el reactor, usaremos el siguiente procedimiento para describir el reactor a un tiempo $\theta = \Delta \theta$.

- 1) Resolver para X_m a un tiempo θ usando la ecuación (132) aquí el subíndice m se refiere al punto "m" en el reactor.
- 2) Resolver para la velocidad de reacción por las ecuaciones (130), (131) y (135).

(3) Expandir ecuaciones (137a) y (137a) para obtener

$$\frac{\pi (d_c)^2}{4 \times 144} \left[\rho \frac{dT_c}{d\theta} + Y_c \frac{dP}{d\theta} \right] = - \frac{1}{n} \left(\frac{dT_c}{dZ} \right) - R \left(\frac{\pi (d_c)^2}{4 \times 144} \right) \quad (154)$$

$$\frac{\pi (d_c)^2 C_p}{4 \times 144} \left[\rho \frac{\partial t}{\partial \theta} + t \frac{\partial P}{\partial \theta} \right] = - \frac{1}{n} \left[\frac{\partial F(t)}{\partial Z} \right] - \frac{\pi (d_c)^2}{4 \times 144} R \Delta H_R + \frac{h \pi d_c (T_w - t)}{12} \quad (155)$$

4) Expandir $\partial P / \partial \theta$ usando la ecuación (132) y (135) y la siguiente identidad:

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} = \left(\frac{\partial P}{\partial X} \right) \left(\frac{\partial X}{\partial Y_c} \right) \left(\frac{\partial Y_c}{\partial \theta} \right)$$

haciendo las sustituciones necesarias se llega a:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} = \frac{1 R P}{R_g (1+273)} \times \left\{ \frac{(1+Y_c)(1-5) - [1-Y_c(1+5)]}{(1+Y_c)^2} \right\} \frac{\partial Y_c}{\partial \theta} \quad (156)$$

Con las ecuaciones (154), (155) y (156), podemos calcular la derivada a tiempo θ , e integrando numéricamente las ecuaciones para todos los puntos del reactor, obtenemos los valores de las variables dependientes P , t y Y_c .

5) Obtener los tiempos derivados de las temperaturas variables para el lado de la coraza y la pared del tubo de las relaciones de diferencia finitas de las ecuaciones (138) y (139).

6) Integrar todas las ecuaciones diferenciales numéricamente.

Para la nomenclatura ver la tabla anexa.

Modelando el equilibrio de fase en sistemas dinámicos

La modelación de sistemas que involucran cambios de fase en uno o más de sus componentes requiere calcular constantes de equilibrio, antes de desarrollar las ecuaciones requeridas de diferencia-finita.

Para sistemas líquido-vapor, la constante de equilibrio, K_i , para el componente i está dada por:

$$K_i = Y_i / X_i \quad (157)$$

Consideraremos que la misma es función de la temperatura, presión y composición de las fases líquido y vapor.

Aplicación a intercambiadores de calor.

En general, no podemos asumir condiciones isotérmicas cuando consideramos sistemas multicomponentes que tienen cambios de fase. Aquí se requiere el siguiente análisis.

Podemos derivar la ecuación (158) para una longitud diferencial de tubo, dY_i , via un balance de energía usando un análisis general de diferencia-finita:

$$\frac{n_i \pi d_i^2}{4 \times 144} \left[\frac{\partial(\rho_i H_i)}{\partial \theta} \right] = - \frac{\partial(W_i H_i)}{\partial Y_i} + \frac{h_i n_i \pi d_i}{12} (T_w - T) \quad (158)$$

Un balance de materia para el componente i y el flujo total, W_i , proporciona:

$$\frac{n_i \pi d_i^2}{4 \times 144} \left[\frac{\partial(\rho_i Z_i)}{\partial \theta} \right] = \frac{\partial(W_i Z_i)}{\partial Y_i} \quad (159)$$

Debido a que es conveniente usar relaciones puntuales del líquido, L_i , y vapor, V_i , y sus correspondientes fracciones mol X_j y Y_j , podemos sustituir las condiciones total y puntual (ecuaciones (160) y (161)) y la relación de equilibrio (ecuación (157)) para obtener:

$$W_i = L_i + V_i \quad (160) \quad W_i Z_j = L_i X_j + V_i Y_j \quad (161)$$

$$\frac{n_i \pi d_i^2}{4 \times 144} \left[\frac{\partial(\rho_i Z_i)}{\partial \theta} \right] = - \frac{\partial(L_i Z_i)}{\partial Y_i} - \frac{\partial(V_i Y_i)}{\partial Y_i} = - \frac{\partial}{\partial Y_i} (L_i X_j) - \frac{\partial}{\partial Y_i} (W_i - L_i) K_j X_j \quad (162)$$

Un balance del flujo total para una diferencial de longitud de tubo dY_i , da:

$$\left(\frac{n_i \pi d_i^2}{4 \times 144} \right) \frac{\partial \rho_i}{\partial \theta} = - \frac{\partial W_i}{\partial Y_i} \quad (163)$$

Podemos tener en este estado, el cambio de presión por diferencial de longitud como una función de las relaciones de flujo, propiedades físicas ϕ_i , y geometría del tubo ψ_i , o bien:

$$dP/dY_i = f(\psi_i, L_i, \phi_i, \Psi_i) \quad (164)$$

Para completar los cálculos para el lado del tubo, necesitamos tres puntos adicionales.

1) Un procedimiento de estimación para calcular los coeficientes individuales de transferencia de calor y los coeficientes compuestos del lado del tubo y la coraza.

2) Una estimación o procedimiento de cálculo para determinar la entalpía de punto o de corriente de el líquido y el vapor.

3) Un procedimiento para estimar las densidades de la porción de líquido y vapor en la corriente.

Las ecuaciones de diferencia finita, para el perfil de temperatura en el lado de la coraza y la pared del tubo son:

$$\frac{dT_k}{d\theta} = \frac{B_o}{A_o} (T_k - T_{wk}) n_T + \frac{C_o}{A_o} \left(\frac{T_{sat} - T_k}{\Delta Y_i} \right) \quad (165)$$

donde:

$$A_o = \rho_o A_o' C_{p_o}$$

$$B_o = -(h_o \pi d_o / 12)$$

$$C_o = -\rho_o v_o A_o C_{p_o}$$

$$\frac{dT_{wk}}{d\theta} = \frac{B_w}{A_w} (T_k - T_{wk}) - \frac{C_w}{A_w} (T_{wk} - t_k) \quad (166)$$

donde:

$$A_w = \rho_w C_{p_w} (d_o^2 - d_i^2) / (4 \times 144)$$

$$B_w = h_o d_o / 12$$

$$C_w = h_i d_i / 12$$

Modelo dinámico.

Después de fijar el tiempo derivativo en cero para obtener la solución al estado estacionario, complementamos la solución dinámica llevando a cabo lo siguiente:

- 1) Calcular los coeficientes compuestos para el lado del tubo y de la coraza, por los métodos dados anteriormente, al tratar el intercambio de calor.
- 2) Calcular las derivadas de las ecuaciones (165) y (166)
- 3) Integrar numéricamente la forma diferencia-finita resultante de la ecuación (157) o (162) para obtener nuevos valores a tiempo $(\theta + \Delta \theta)$ de la cantidad Z_i ; La diferencia-finita de la ecuación (159) es:

$$\frac{d(\rho_{i,k} Z_{i,k})}{d\theta} = \frac{W_{i,k}(n_{i,k}) Z_{i,k}(n_{i,k}) - W_{i,k} Z_{i,k}}{[n_{i,k} d_o^2 / (4 \times 144)] \Delta Y_i} \quad (167)$$

Para un número de componentes M en el sistema, la fracción mol $Z_{j,k}$ debe sumar uno ó :

$$\sum_{j=1}^M Z_{j,k} = 1 \quad \text{ó} \quad k = N-1, N-2, \dots, 2, 1 \quad (16B)$$

Este procedimiento permite calcular $\rho_{j,k}$, directamente y para estimar la derivada $d\rho_{j,k}/d\theta$.

- 4) Obteniendo valores de $(\rho_{j,k}, H_{j,k})$ y, con el valor de del paso 3), obtenemos el valor de $H_{i,k}$, por integración numérica de la forma finita-diferencia de la ecuación (15B) la cual es:

$$\frac{d(\rho_{j,k} H_{j,k})}{d\theta} = \left(\frac{g_{j,k} \rho_{j,k}}{n_r \pi d_i^2} \right) \left\{ \left(\frac{w_{i,k(2\theta)} H_{i,k(2\theta)} - w_{i,k} H_{i,k}}{\Delta Y_i} \right) + (h_{i,r} \pi d_i / r) \times (T_{w,k} - t_k) \right\} \quad (16A)$$

El procedimiento es ahora iterativo.

- 5) Asumiendo una temperatura, t_k , al punto, 4, en el cambiador, podemos resolver para la fracción de vapor por medio de:

$$f\left(\frac{V_{i,k}}{W_{i,k}}\right) = \sum_j \frac{Z_{j,k} (K_{j,k} - 1)}{(K_{j,k} - 1)(V_{i,k} / W_{i,k}) + 1} = 0 \quad (170)$$

Podemos ahora calcular las composiciones puntuales para las composiciones (es decir, nuevas) calculadas de líquido y vapor de las siguientes ecuaciones:

$$\left(\frac{V}{L}\right)_{i,k} = \frac{(L/W)_{i,k}}{(V/W)_{i,k}} = \frac{1 - (V/W)_{i,k}}{(V/W)_{i,k}} \quad (171)$$

$$Y_{j,k} = \frac{Z_{j,k} [(L/V)_{i,k} + 1]}{1 + (L/V)_{i,k} / K_{j,k}} \quad (172)$$

$$X_{j,k} = Y_{j,k} / K_{j,k} \quad (173)$$

Usamos el procedimiento de estimación de entalpía para calcular la entalpía puntual basada en los valores de composición anteriores. Podemos iterar via nuestra temperatura seleccionada hasta obtener un valor, para la diferencia en la entalpía de la corriente, que sea menor a un error fijado anteriormente.

- 6) Integrando numéricamente las derivadas calculadas en el paso 2), obtenemos nuevos perfiles de temperatura para la pared y la corriente del lado de la coraza.

- 7) Integrando numéricamente la ecuación (163) obtenemos nuevos valores de $w_{i,k}$, o usando la forma algebraica de la ecuación (163). La derivada ha sido calculada en el paso 3):

$$W_k = W_{k+1} - \frac{n_1 \pi d_i^2}{4 \times 144} \left(\frac{dP_{i,k}}{d\theta} \right) \Delta Y, \quad (174)$$

- 8) Retornamos al paso 1), y procedemos al siguiente intervalo de tiempo, θ .

Destilación de Rayleigh.

Prestemos atención a dos problemas que no son fáciles de simplificar porque: a) El sistema es multicomponente, o b) la constante de equilibrio no es constante o no es la volatilidad relativa.

Consideremos el siguiente problema: En un proceso batch, tenemos una mezcla equimolar de A y B. El componente A es más volátil, pero nosotros deseamos dejar este componente en el tanque y destilar el menos volátil por el somo. La adición de agua a la mezcla forma un azeótropo con el componente B, y podemos concentrar el componente A y el exceso de agua en el tanque. La adición de agua a la mezcla de reacción es requerida en el siguiente paso del proceso batch, por lo que no representa un gusto adicional la separación de agua y el componente A.

El sistema mostrado en la fig.29 esta inicialmente a reflujo total. A un tiempo dado, cerraremos la válvula de reflujo y empezaremos a retirar el producto del sistema.

Mediante la condensación de un vapor, proveeremos la energía para vaporizar el material en el tanque, podemos escribir la ecuación para el balance de energía en el lado del tubo y la pared del tubo. Porque consideramos un cambio de fase isotérmico, en ambos lados del cambiador, no necesitamos seccionar (es decir, usar procedimientos diferencia-finita) el tubo. Las ecuaciones son:

$$S = \frac{h_i n_1 \pi d_i T_c}{12 \lambda} (t - T_w) \quad (175)$$

$$\frac{dT_w}{d\theta} = \frac{B_w}{A_w} (T - T_w) - \frac{C_w}{A_w} (T_w - t) \quad (176)$$

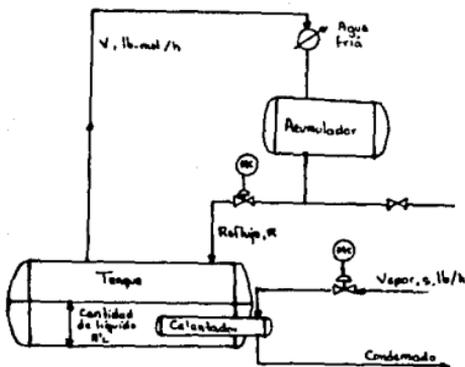


FIG. 28. DESTILACIÓN DE RAYLEIGH.

La ecuación del balance de materia total para el fluido del tanque es:

$$d(\rho_L V_L)/d\theta = -V \quad (177)$$

$$d(H'_L)/d\theta = -V \quad (178)$$

La ecuación (178) permite obtener un cálculo de la densidad. En algunos problemas, el decremento en H'_L , y por lo tanto el decremento en el nivel del líquido, disminuye la superficie de transferencia de calor, y debemos usar la ecuación (177).

El balance de materia para el componente j está dado por:

$$d(H'_L X_j)/d\theta = -V Y_j \quad (179)$$

Sustituyendo la ecuación (157) en la (179) y expandiendo:

$$dX_j/d\theta = \frac{-X_j [VK_j + (dH'_L/d\theta)]}{H'_L} \quad (180)$$

El balance de energía para el sistema del tanque está dado por:

$$Q_c = \frac{V_{\text{domo}} \pi d_c T_c}{12} (T_w - T) \quad (181)$$

$$dH_L/d\theta = \frac{Q_c - V H_V - H_L(dH_L/d\theta)}{H'_L} \quad (182)$$

Un cálculo de la temperatura de burbuja relaciona la composición del líquido y la temperatura del tanque. Para que el equilibrio exista entre el líquido en el tanque y el vapor que deja el tanque, las temperaturas de las dos fases son iguales. Podemos calcular las entalpías del líquido y el vapor mediante un procedimiento apropiado.

Para el ejemplo, colectaremos el destilado en el acumulador del domo. Podemos calcular el tiempo de retraso entre la corriente de entrada y salida al condensador. Sin embargo, esto es de poco interés en sí. Especificaremos para este ejemplo que el condensador condensará y subenfriará el vapor del domo.

En nuestro proceso, no tenemos un sistema de control para ajustar el flujo de vapor al rehervidor, mostramos una válvula manual en la línea de vapor. Como la temperatura del tanque se incrementa, la condensación de vapor disminuye, y la reducción correspondiente de flujo reduce la caída de presión a través de la válvula manual. Esta relación entre la temperatura del vapor y una ecuación para el modelo de válvula de control, provee las ecuaciones necesarias para complementar el análisis.

Resultados.

Empieando un programa de computadora se obtienen los resultados como una función del tiempo, y estos se muestran en la fig. 29.

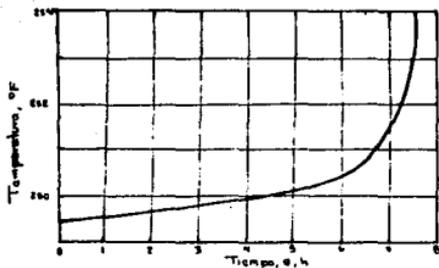
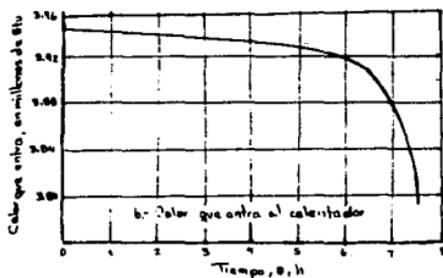
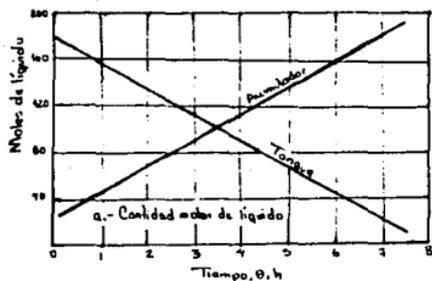


FIG. 29. RESULTADOS PARA LA DESTILACION DE RAYLEIGH.

Conclusiones.

La amplitud de conocimientos que requiere un ingeniero de proyecto es tan vasta, que no es posible cubrirla en un trabajo de tesis, sin embargo, los temas seleccionados en este trabajo permiten fortalecer algunas áreas, pero sobre todo concentrar los puntos medulares que un ingeniero de proyecto requiere en dichas áreas.

La ingeniería económica es una de las áreas que durante la carrera nos dan una información bastante completa, que nos permite comprender los aspectos que ésta cubre, y son necesarios en el desarrollo profesional de los ingenieros químicos. Por esta razón, aunque esta parte de la tesis no es una aportación en cuanto a su contenido, sí constituye la concentración de la información relacionada.

Por lo que se refiere al área civil, esta es una de las más débiles en la carrera, siendo por lo tanto una aportación, no solo en la integración de los conocimientos, sino también en la presentación del material más importante de dicha disciplina, para el desarrollo de un proyecto industrial.

En lo que toca a los aspectos básicos de corrosión, durante la carrera de Ingeniería Química, se proporciona a los alumnos las bases para poder comprender posteriormente los aspectos prácticos de la corrosión. Esta sección del trabajo presenta dichos aspectos desde un punto de vista aplicativo, para la selección de materiales y para la protección adecuada de los equipos de proceso.

En lo que se refiere a los aspectos de tuberías, en general la información que contiene el capítulo IV, casi en su totalidad no se proporciona durante la carrera, la cual se enfoca principalmente hacia flujo de fluidos y a los equipos en forma individual. Así en este trabajo se reúnen aspectos muy generales sobre tuberías, siendo estos una aportación a los conocimientos obtenidos durante la carrera de Ingeniería Química.

En cuanto a la Ingeniería eléctrica, se ha observado una disgregación de la información y de los conocimientos que un ingeniero químico requiere para el desarrollo de un proyecto industrial, por lo que en esta sección se ha logrado concentrar la información básica y se ha complementado algunas áreas que no se tocan en la formación profesional.

Dado que todo proceso requiere de un control adecuado, es indispensable que el ingeniero de proyectos, maneje los conceptos básicos de instrumentación y conozca el lenguaje relacionado con esta disciplina. En el nuevo plan de estudios de la carrera se dará a los alumnos una formación más sólida en esta disciplina, por tal motivo el material aquí presentado será un buen apoyo para tal fin.

Por último es conveniente señalar que el plan de estudios de la carrera de Ingeniería Química da una solidez matemática suficiente como para comprender algunos ejemplos sencillos de simulación dinámica de procesos, por lo que en el último capítulo del trabajo se incluyen algunos de dichos modelos.

BIBLIOGRAFIA.

ARTICULOS:

- 1) "Basic concepts, terminology and techniques for process control". Chemical Engineering. Mayo 30, 1983, pp. 58-66.
- 2) "Building codes for process plants". Chemical Engineering. Dic. 27, 1982, pp. 57-60.
- 3) "Capital Costs and Depreciation" Chemical Engineering. Julio 23, 1973. pp. 118-121.
- 4) "Cathodic and anodic protection for corrosion control". Chemical Engineering. Dic. 27, 1971, pp. 73-79.
- 5) "Control the process and control corrosion". Chemical Engineering. Oct. 18, 1971, pp. 139-146.
- 6) "Corrosion protection via coatings". Chemical Engineering. Ene. 10, 1972, pp. 103-108.
- 7) "Direct-synthesis and adaptative controls". Chemical Engineering. Feb. 6, 1984, pp. 99-103.
- 8) "Dynamic modeling of tank-type reactor systems". Chemical Engineering. Jun. 28, 1982, pp. 97-100.
- 9) "Dynamic modeling of tubular reactor systems". Chemical Engineering. Ag. 23, 1982. pp. 91-94.
- 10) "Electric motors are the basic CPI prime movers". Chemical Engineering. Mar. 12, 1979, pp. 85-91.
- 11) "Electric wire and cables". Chemical Engineering. Mayo 7, 1979. pp. 89-94.
- 12) "Electrical protective devices": Chemical Engineering. Sept. 10, 1979, pp. 137-140.
- 13) "Electrical switchgear": Chemical Engineering. Jun. 18, 1979, pp. 119-122.

- 14) "Electrical transformers". Chemical Engineering. Ene.29,1979.pp.111-115.
- 15) "Electrochemical corrosion". Chemical Engineering. Junio 14, 1971.pp. 102-106.
- 16) "Engineering economics for Chemical Engineers". Chemical Engineering. Junio 25,1973.pp.103-107.
- 17) "Feedback control modes". Chemical Engineering. Ag.8,1983.pp.79-85.
- 18) "Feedback methods for process control systems". Chemical Engineering. Nov.14,1983.pp.233-238.
- 19) "Finding answers to corrosion problems".Chemical Engineering. Abril 3, 1972.pp. 97-102.
- 20) "Forces acting in and on structural materials".Chemical Engineering. Nov.1,1982.pp. 89-93.
- 21) "Fundamentals of chemical process dynamics". Chemical Engineering. Jun.29,1981.pp 74-80.
- 22) "Fundamentals of corrosion". Chemical Engineering. Mayo 17, 1971. pp 127-132.
- 23) "Fundamentals of electricity".Chemical Engineering. Ene.1,1979.pp.72-76.
- 24) "Geometric properties of structural shapes".Chemical Engineering. Ag. 9,1982.pp.61-64.
- 25) "Good Engineering design minimizes corrosion". Chemical Engineering. Nov. 15, 1971.pp. 163-166.
- 26) "How to estimate capital costs"Chemical Engineering. Abril 1, 1974. pp 71-76.
- 27) "How to evaluate Working Capital for a Company". Chemical Engineering. Ag.5,1974. pp.101-106.
- 28) "How to use feedback loops to meet process conditions". Chemical Engineering. Abril 30, 1984.pp. 77-83.
- 29) "Lighting process plants and surge protection". Chemical Engineering. Julio 16,1979. pp.107-112.

- 30) "Manufacturing costs and how to estimate them".
Chemical Engineering. Abril 15, 1974. pp. 91-96.
- 31) "Masonry structures". Chemical Engineering.
Mayo 2, 1983. pp. 67-70.
- 32) "Materials selection for corrosion control". Chemical
Engineering. Mar. 6, 1972. pp. 113-118.
- 33) "Measuring corrosion rates in the process plant".
Chemical Engineering. Ag. 23, 1971. pp. 89-94.
- 34) "Modeling heat-transfer systems". Chemical Engineering.
Mayo 3, 1982. pp. 93-98.
- 35) "Modeling Process systems on analog/hybrid computers".
Chemical Engineering. Dic. 28, 1981. pp. 63-68.
- 36) "Modeling process systems via digital computers".
Chemical Engineering. Mar. 8, 1982. pp. 97-103.
- 37) "Modeling the phase equilibria in dynamics systems".
Chemical Engineering. Nov. 29, 1982. pp. 75-79.
- 38) "Paints prevent corrosion". Chemical Engineering.
Feb. 7, 1972. pp. 82-87.
- 39) "Polarization data yield corrosion rates". Chemical
Engineering. Julio 26, 1971. pp. 99-104.
- 40) "Preventive maintenance of electrical systems".
Chemical Engineering. Dic. 3, 1979. pp. 101-103.
- 41) "Principles of accounting". Chemical Engineering.
Julio 8, 1974. pp. 93-98.
- 42) "Process control loops". Chemical Engineering. Ag. 24,
1981. pp. 111-117.
- 43) "Reinforced concrete for structures and equipment".
Chemical Engineering. Mar. 7, 1983. pp. 163-169.
- 44) "Solving the mathematical models for dynamic systems".
Chemical Engineering. Nov. 16, 1981. pp. 271-277.
- 45) "Steel and concrete structures for supporting process
equipment". Chemical Engineering. Oct. 31, 1983. pp. 51-56.

- 46) "Steel-frame construction for process structures".
Chemical Engineering. Julio 11, 1983, pp. 74-83.
- 47) "Stress corrosion". Chemical Engineering. Sept. 20,
1971, pp. 159-164
- 48) "Structural Design of Chemical process plants". Chemical
Engineering. Mayo 17, 1982, pp. 96-100.
- 49) "Supports for process vessels and storage equipment".
Chemical Engineering. Sept. 5, 1983, pp. 119-127.
- 50) "Time, value of money" Chemical Engineering.
Sep. 7, 1973, pp. 123-125.
- 51) "Tuning process controllers". Chemical Engineering.
Sept. 19, 1983, pp. 67-72.
- 52) "Wall and roof construction for process and plant
buildings". Chemical Engineering. Ene. 23, 1984, pp. 77-81.

LIBROS:

- 1) "Plant Design Economics for Engineers". Max S. Peters.
Mc Graw-Hill Book Company, Inc. 1958.
- 2) "Chemical Engineering Plant Design". Frank C. Vilbrandt.
Mc Graw-Hill Kogakusha, LTD.
- 3) "Ingeniería de Procesos". Manual de diseño de procesos
químicos apropiados para países en desarrollo". José
Giral. Eco. Barnés. UNAM, 1977.
- 4) "Chemical Engineerings' Handbook". Robert H. Perry.
Mc Graw-Hill. 5a. Edición.
- 5) " Piping Design for Process Plants". Howard F. Rase.
John Wiley & Sons.
- 6) "Process Plant Layout". J.C. Mecklenburg. Ed. George
Godwin. London & N.Y.