

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

Sistema de Control Electrónico para una
Columna de Destilación Fraccionada



T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
I N G E N I E R O
Q U I M I C O
P R E S E N T A :
GUILLERMO BEDOLLA TOVAR



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 esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

CLAS Tesis 1977
ABO M-49 49
FECHA _____
PRES _____



JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE:

PRESIDENTE:	ING. MAYO MARTINEZ KAHN
VOCAL:	ING. ANTONIO FRIAS MENDOZA
SECRETARIO:	ING. CLAUDIO AGUILAR MARTINEZ
1er. SUPLENTE:	ING. ALBERTO DE LA FUENTE Z.
2o. SUPLENTE:	ING. RAMON ARNAUD HUERTA

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

FACULTAD DE QUIMICA U.N.A.M.

SUSTENTANTE:

GUILLERMO BEDOLLA TOVAR

ASESOR DEL TEMA:

ING. ANTONIO FRIAS MENDOZA

A MI ESPOSA

Xóchtli, vivo ejemplo de
nobleza y sensibilidad.

Con profundo amor.

A MI HIJO

Memito, hombrecito que empiezas a vivir. Con mis mejores deseos y esfuerzo porque en la vida seas un hombre alegre, exitoso y noble.

A MIS HERMANOS

Marco y Maruchi, que me han acompañado moralmente a lo largo de la vida.

A MI MADRE

Ana María, de quien he aprendido que la alegría y el amor a los demás es lo más importante en esta vida.

A MI PADRE

Guillermo, hombre con muy alta calidad humana. Gracias por tu apoyo constante.

A MIS MAESTROS Y
ESCUELA

Con profundo agradeci-
miento a una bella etapa

A MIS AMIGOS

Con gran estimación

A ROBERTO HERNANDEZ A.

Por su valiosa ayuda

I N D I C E

- I. INTRODUCCION

- II. DESCRIPCION Y ANALISIS DINAMICO DEL PROCESO
 - II.1 Concepto de destilación
 - II.2 Equipo para destilación
 - II.3 Análisis dinámico del proceso
 - II.4 Variables a ser controladas

- III. SISTEMAS DE CONTROL
 - III.1 Introducción al control
 - III.2 Terminología de control
 - III.3 Sistemas de control básicos
 - 1. Control de destilado por medio de balance de materia directo.
 - 2. Control de fondos por medio de ba lance de materia directo.
 - 3. Control de reflujo por medio de ba lance de materia indirecto.

4. Control de vapor por medio de ba
lance de materia indirecto.

III.4 Sistemas de control predictivo "Feedforward" (^{prealimentación} ~~retroalimentación~~)

- A. Separación constante
- B. Máxima separación

IV. SELECCION DE ELEMENTOS DE CONTROL

IV.1 Elementos integrantes del sistema

IV.2 Algunos conceptos básicos del control

IV.3 Revisión técnica de los elementos

- A. Transmisor de temperatura
- B. Controlador indicador
- C. Extractor de raíz cuadrada
- D. Multiplicador-divisor
- E. Módulo atraso/retraso
- F. Estación de relación remota
- G. Transductor electroneumático
- H. Transmisor de presión dife-
rencial.
- I. Transmisor de nivel

J. Transmisor de presión

K. Analizador de composición

V. ANALISIS DE COSTOS

V.1 Evaluación técnica

V.2 Evaluación económica

VI. CONCLUSIONES

Bibliografía

CAPITULO I
INTRODUCCION

I. . INTRODUCCION

El presente trabajo tiene como objetivo principal ilustrar la mejor manera de controlar automáticamente una torre de destilación, para lo cual, primeramente se analizarán las variables que intervienen en el proceso de la destilación y después se plantearán los diferentes sistemas de control de la torre. Una vez que se haya hablado sobre el sistema elegido y la selección de instrumentos adecuados, se hará un análisis del costo total del sistema usando como base la instrumentación electrónica.

La instrumentación electrónica es la instrumentación del futuro, o mejor dicho es una realidad en el presente. Su mayor facilidad de instalación, su señal más rápida y su menor falibilidad han sido las causas originarias de la etapa de transición de instrumentación neumática a electrónica en que nos encontramos.

La instrumentación neumática resultó maravillosa en su tiempo pues fue un factor contribuyente a la automatización de las plantas de la Industria Química. Su aparición contribuyó a resolver muchos problemas, a salvar bastantes obstáculos; y con el paso del tiempo fué evolucionando de una ma-

nera notable.

Pero el desarrollo de la Industria Química, el proceso tecnológico, trajo consigo procesos más completos y complejos que requerían de un control más preciso, más seguro y más confiable, pero sobre todo se requirió de una característica muy importante: mayor velocidad en el registro de las variables de proceso y mayor rapidez en la señal del instrumento al elemento final de control. De ahí que se hiciera necesario el surgimiento de la instrumentación electrónica que cumplía con los requerimientos antes mencionados y que además reducía enormemente uno de los problemas que se presentaban anteriormente: el paro o estropeamiento de un proceso en el caso de una falla en el abastecimiento de aire a los instrumentos.

Se eligió una columna de destilación fraccionada debido a que en ella se tiene el concurso de gran cantidad de variables que, debido a su naturaleza, son controladas por instrumentos muy diferentes entre sí que requieren trabajar en una armonía completa. Esto ofrece un campo muy interesante para el análisis de diversos instrumentos y varias interrelaciones que se pueden lograr con ellos.

En el capítulo II se describirá brevemente, a manera de antecedente, el principio de la destilación y los tipos de destilación que existen para posteriormente exponer las diferentes variables que intervienen en ella y cómo afecta la variación de cada una al sistema. Es importante hacer notar que únicamente se mencionan los conceptos y ecuaciones que el ingeniero de control requiere para analizar los sistemas de control de una columna de destilación.

En el capítulo III se indicarán los tipos de control para cada variables, se expondrán los diversos sistemas generales de control para una columna de destilación y finalmente se elegirá el que se considere el sistema más adecuado y completo y se explicará en detalle.

En el capítulo IV se indicarán las características técnicas de los instrumentos de control a emplearse en la columna.

En el capítulo V se hará un análisis de costos de todo el equipo de control electrónico y se comparará con su similar neumático.

Finalmente, en el capítulo VI se presentarán las conclusiones del trabajo.

CAPITULO II

DESCRIPCION Y ANALISIS
DINAMICO DEL PROCESO

II. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DINÁMICO DEL PROCESO

II.1 Concepto de Destilación

Uno de los procesos que son indispensables en la mayoría de las industrias, principalmente la petroquímica, es la destilación. No es muy difícil encontrarnos con una columna de destilación en cualquier planta que visitemos. Indudablemente es el proceso unitario más ampliamente usado.

Se tiene conocimiento de que la destilación ya era empleada, aunque de una manera bastante rudimentaria, en Alejandría para obtener trementina o aguarrás a partir de la resina de pino; también los árabes producían licor destilado del vino y los griegos preparaban medicinas en el siglo V A.C.

Posteriormente el concepto de destilación se fué haciendo más completo debido al surgimiento de teorías que lo complementaban como la regla de las fases de Gibbs que estableció un criterio de equilibrio para cualquier sistema químico y el cual fué posteriormente aplicado a la destilación.

Algunos matemáticos como Mc. Cabe y Thiele tomaron como base la regla antes mencionada para desarrollar el diseño de columnas el cual, conjuntamente con investigaciones y

estudios de comportamiento y eficiencia de columnas, ha hecho de la destilación una ciencia más exacta.

Pero ¿Qué es la destilación, qué sucede dentro de una columna, cuáles son las variables que intervienen en ella, y cómo afecta el cambio de una de ellas a las demás en la columna?. En el curso de este capítulo se pretende explicar esto.

La destilación es la separación de una mezcla de varios componentes que se encuentran en fase líquida aprovechando - sus diferentes presiones de vapor o puntos de ebullición.

Existen dos tipos de destilación: La destilación batch y la destilación continúa.

Destilación batch es aquella en la cual se introduce a la columna una determinada cantidad de líquido que va a ser destinado. Este tipo de sistema no se lleva a cabo muy frecuentemente por su incosteabilidad debida a las pérdidas de tiempo y dinero, puesto que se requiere de una preparación previa de la temperatura y la presión en la columna.

Destilación continúa es aquella que se caracteriza por la constante alimentación de producto inicial y constante recolección de productos finales. Los métodos modernos han demandado que la destilación se lleve a cabo comunmente sobre esta base.

II.2 Equipo para destilación

De acuerdo a su construcción interna existen tres tipos de columnas de destilación:

- a) Columnas empacadas
- b) Columnas con cápsulas de burbujeo
- c) Columnas con platos perforados

Columnas empacadas.- Es el tipo de columnas más simple usado en la actualidad. Esta columna consiste de un cilindro vertical largo que contiene piezas de material irregular llamado empaque, tales como piedras, coque u objetos de forma especial. Estos últimos usualmente tienen forma geométrica y están hechos de algún material resistente a la corrosión por el líquido y el vapor; además se pretende que presenten la mayor área superficial posible pero también el menor volumen y resistencia al flujo.

El reflujo que fluye hacia abajo de la columna es rociado en forma de película fina sobre el empaque y el vapor asciende a lo largo de la columna entrando en contacto con la superficie líquida, creando un equilibrio.

Dependiendo del tipo de empaque, varios pies de altura

de empaque pueden ser iguales a un plato perforado o un plato con cápsulas de burbujeo que ocupan menos de un pie de altura.

Columnas con cápsulas de burbujeo.- Son las más usadas universalmente. Los vapores ascienden a través de las cápsulas y burbujan para lograr contacto con el líquido en el plato. El líquido excedente en el plato pasa como reflujó al plato inferior a través de un canal que conecta a ambos.

Hay usualmente bastantes cápsulas en cada plato y están diseñadas para formar pequeñas burbujas. La caída de presión a lo largo de la columna se debe principalmente a la cabeza del líquido a través de la cual deben pasar las burbujas y también hay una pequeña cabeza debida a la fricción por la velocidad del gas.

Columnas con platos perforados.- Son muy similares a las columnas con cápsula de burbujeo pero difieren en que aquí pequeños orificios en los platos sustituyen a las cápsulas de burbujeo. La velocidad ascendente del vapor evita que el líquido pase a través de estos orificios.

La mayor ventaja de este tipo de columnas es su habilidad

dad para manejar materiales densos.

La caída de presión a lo largo de la columna es debida a la cabeza del líquido en cada plato, a través de la cual debe pasar el vapor. La caída de presión debida a fricción del vapor quizá sea un poco más alta que en las cápsulas de burbujeo.

Una columna de destilación está complementada por los siguientes equipos: condensador, recalentador, acumulador y eyector.

El condensador es el cambiador de calor que disminuye abajo de su punto de ebullición la temperatura del vapor que sale de la parte superior de la columna, para que un líquido destilado sea obtenido. En la mayoría de los casos se usan condensadores de superficie en los cuales el medio enfriador no se mezcla con los vapores.

El acumulador tiene por objeto recolectar el condensado

El eyector o bomba de vacío se usa únicamente en aquellos casos en que la columna sea operada a presión inferior a la atmosférica, se emplea para sacar los gases no condensables que se obtengan.

El recalentador es un condensador de calor usado como fuente proveedora de energía calorífica a la columna para el

proceso de destilación

II.3 Análisis dinámico del proceso

El objetivo de este capítulo es analizar dinámicamente una columna de destilación y por ello se verá con más detalle el proceso y las variables involucradas en él.

Supongamos que se tiene una mezcla en equilibrio con su vapor y esa mezcla está formada por dos componentes con presiones de vapor diferentes.

Para determinar la presión de vapor en equilibrio de cada componente en una mezcla se necesita multiplicar el porcentaje de este componente (en peso molecular o fracción mol) por su presión de vapor en equilibrio como fluido puro. Esta presión de vapor es función de la temperatura, y la temperatura de ebullición asociada a una presión dada es conocida como temperatura de punto de burbuja.

Como ejemplo, asumiremos que tenemos una mezcla de 40% de benceno y 60% de tolueno a 95.25°C y se encuentra en equilibrio. Consultando algún manual sabemos que las presiones de vapor en equilibrio del benceno y el tolueno puro son 1 180 mm. Hg. y 481 mm. Hg. respectivamente. Esto signi-

fica que la presión de vapor del benceno en la mezcla será $(0.40)(180) = 72$ mm. Hg y para el tolueno será $(0.60)(180) = 108$ mm. Hg. La presión total de la mezcla será $(72 + 108) = 180$ mm. Hg. La fracción molar de benceno en el vapor será $(72/180) = 0.40$ y para el tolueno será $(108/180) = 0.60$.

Por otro lado, la ley de Dalton establece que para una mezcla gaseosa la composición (en peso molecular o fracción mol) de un componente es igual a su presión de vapor dividida entre la presión de vapor total.

De tal modo que la composición de benceno en el vapor será $72/(72 + 108) = 0.40 = 40\%$. Esto significa que el tolueno sería $108/(72 + 108) = 0.60 = 60\%$. Si este vapor se sacara y condensara, el líquido resultante tendría la misma composición de 40% para benceno y 60% para tolueno. Por lo tanto, en un proceso de vaporización parcial de una mezcla líquida seguida de una condensación de el vapor, se puede obtener un producto más rico en benceno en relación a la mezcla original. Esto ilustra el proceso de separación física por destilación.

Una gráfica de equilibrio ilustra cómo es aprovechable este proceso. En el eje Y se grafica la composición porcentual (en peso molecular) del componente en el vapor y en el

eje X se grafica la composición del componente en el líquido.

Un ejemplo de lo anterior puede ser la gráfica de curva de equilibrio para un sistema alcohol metílico-agua. Como se muestra en la figura 2.1. Si se efectuase una serie de destilaciones simples en las cuales los vapores de cada paso o etapa fueran condensados y vapores en equilibrio se lograrán del condensado, sería posible obtener una separación mucho mayor que la que se lograría a partir de una destilación simple.

Si usamos la gráfica anterior para alcohol metílico y agua en un caso que se tenga 10% de alcohol metílico en un líquido, los vapores de equilibrio obtenidos tendrán una composición de 41.8% del mismo alcohol. Si estos vapores se condensan y nuevamente se sujetan a otra destilación, los vapores resultantes tendrán una concentración de 74% de alcohol metílico; y así estos pasos se pueden repetir hasta lograr un producto casi puro.

Durante ese proceso la composición del componente más volátil se va incrementando conforme pasamos de una etapa a la otra, pero su temperatura de punto de burbuja va decreciendo. Por lo tanto, en toda operación que incluya una serie

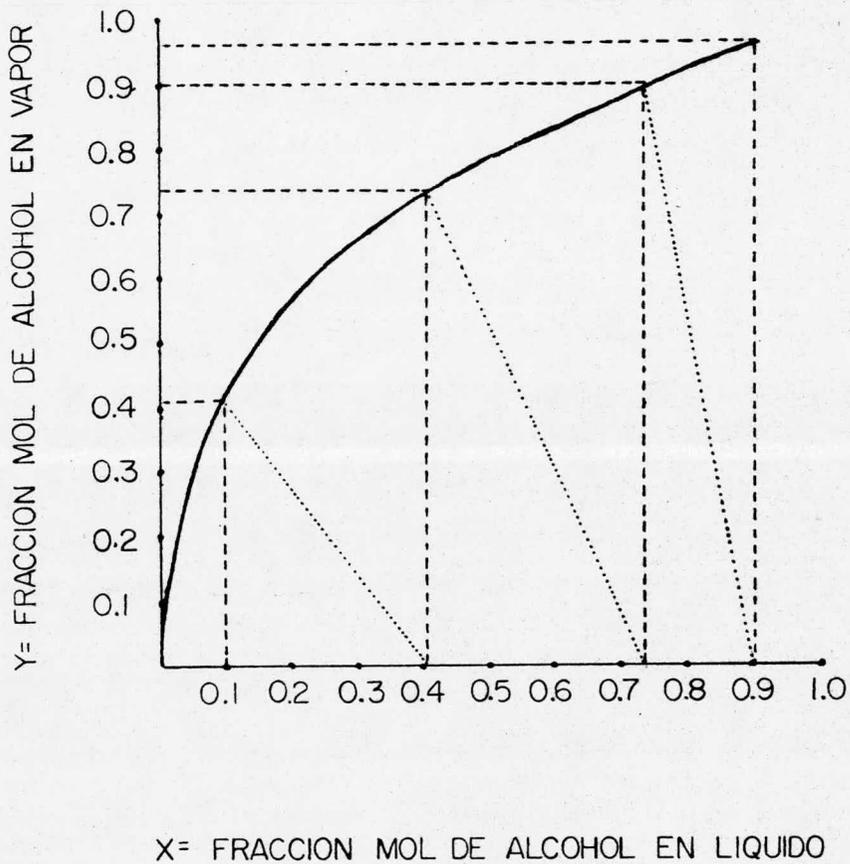


FIGURA 2.1

de etapas de destilación se tendrá un perfil de temperatura, el cual es inverso al perfil de concentración.

Esa operación por etapas es una forma simplificada de lo que sucede en una columna de destilación. Este tipo de destilación es conocido como rectificación.

La rectificación es definida como una operación unitaria en la cual ocurre una vaporización en etapas repetidas para lograr una mayor separación que la obtenida por una sola destilación. El término fraccionación es sinónimo a rectificación y los dos se usan indistintamente.

En una columna de destilación se alimenta un líquido -- constituido por dos o más componentes con el objeto de lograr la separación de éstos a través de su diferente volatilidad. La sustancia más volátil se obtiene en la parte superior y la menos volátil en la parte inferior.

Para tal efecto, el fluido original es alimentado a la columna a una temperatura y composición precalculadas y controladas. Debido a su carácter líquido y a su densidad, la alimentación inmediatamente tiende a bajar por gravedad hacia el fondo de la columna, en donde un recalentador se encarga de inyectarle calor y transformarla en vapor. Estos vapores in-

mediatamente emprenden una trayectoria ascendente a través de todos los platos de la columna hasta llegar a salir por la parte superior, en donde son recibidos en un condensador que se encarga de transformar estos vapores en líquido, por medio de un agente refrigerante que disminuye su temperatura abajo de su punto de ebullición y enviarlos a un acumulador de condensado.

Anteriormente se dijo que la separación de una sustancia con respecto a otra se lleva a cabo de manera más completa mientras más destilaciones parciales se efectúen sobre la mezcla; a ello se debe que una parte del producto condensado sea extraída y la otra parte sea recirculada nuevamente a la columna en forma líquida (relación de reflujo).

Este líquido recirculado baja a través de todos los platos de la columna y entra en contacto íntimo con el vapor que asciende, creando una relación parcial condensación-vaporización en cada plato.

De la breve descripción anterior se transluce que este proceso no ocurre por casualidad o mágicamente. Se tiene que recurrir a cálculos previos en base a conceptos o fórmulas descriptivas del proceso y también al control estricto de las

diferentes variables involucradas, si se desea lograr una destilación exitosa.

La materia está presente en la columna a través de los flujos de líquidos y vapores que se tienen en ella con diversas concentraciones.

La energía está presente en la columna a través de la adición y eliminación de calor que efectúan el recalentador y el condensador.

La dinámica del proceso está representada por el factor materia y el factor energía, los cuales se cuantifican y cualifican a través de un balance de materia y un balance de energía, que representan los conceptos o fórmulas descriptivas del proceso que se mencionan anteriormente.

El balance de materia indica que la masa total de sustancias que entran a la columna debe ser igual a la masa total de las sustancias que se extraen de ella, excepto para alguna sustancia que pueda ser retenida o acumulada en ella. Este balance de materia aplica a componentes y a flujos totales. Como se muestra en la figura 2.2

Un balance general en la columna de destilación nos indica que el flujo de alimentación por unidad de tiempo debe

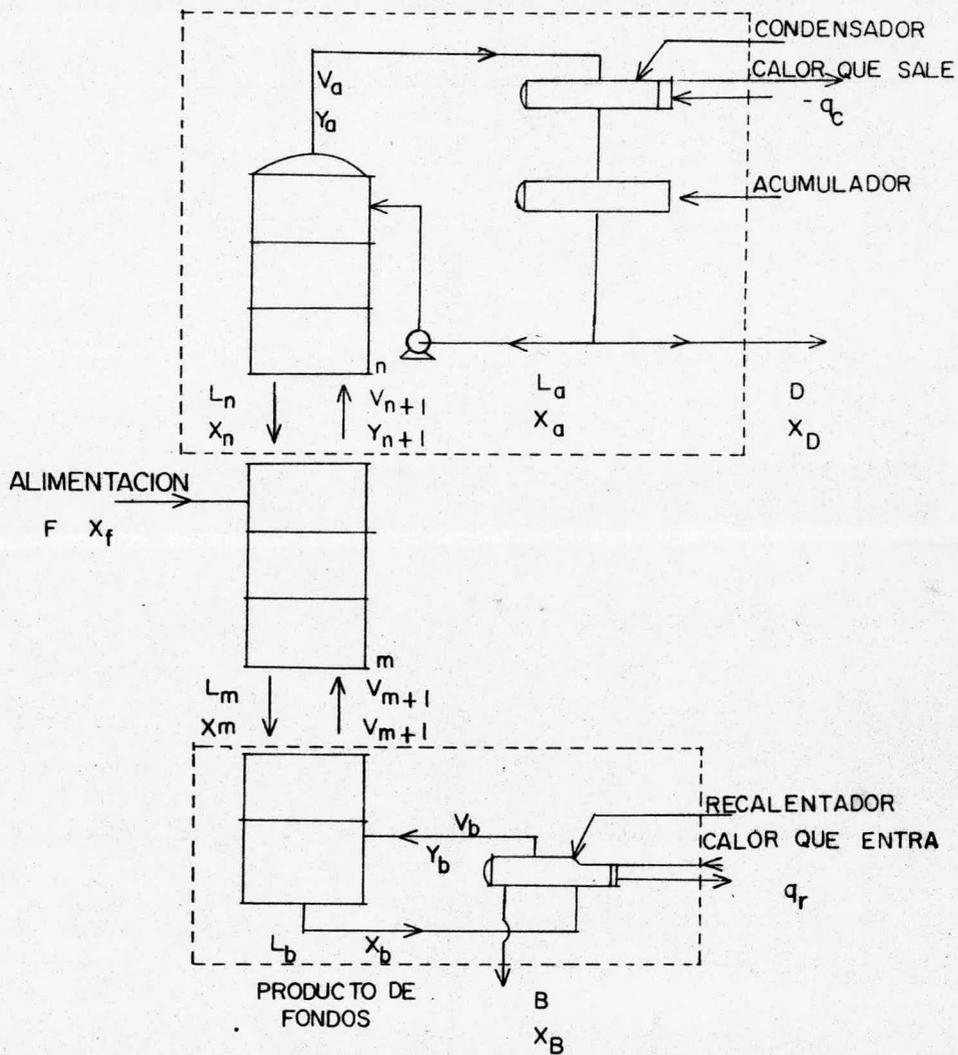


FIGURA 2.2

ser igual a la suma de flujo de destilado y flujo de fondos que salen por unidad de tiempo.

$$F = D + B$$

en donde, F es la alimentación

B es el producto de fondos

D es el destilado

$$F X_f = D X_d + B X_b$$

En esta última ecuación se están tomando en cuenta las composiciones de los productos que entran o salen de la columna. A través de ella se puede calcular un determinado flujo o su composición.

Una suposición básica para columnas de destilación es que la cantidad de reflujo líquido por unidad de tiempo que va hacia el fondo de la columna es igual en cualquier plato; así los balances de materia pueden ser hechos en cualquier plato de la sección de enriquecimiento o de agotamiento. Las ecuaciones resultantes de estos balances se usan para predecir el número de platos requeridos en cada sección.

Existen ciertas relaciones muy importantes entre los flujos, que se derivan del balance:

Relación de reflujo (L/D).- Relaciona la cantidad del lí

quido destilado que se regresa a la columna con la cantidad de producto destilado que se obtiene de ella. El concepto de relación de reflujo interno es igual que el anterior pero aplicado a algún plato en particular.

Relación D/F.- Relaciona la cantidad de producto destilado obtenido con la cantidad de producto alimentado.

El balance de materia es un elemento indispensable tanto para el cálculo de dimensiones de una columna de destilación y sus curvas de operación como para conocer el comportamiento de los flúidos dentro de ella.

El balance de energía es aquel que ayuda al cálculo de la energía necesaria para que el proceso se lleve a cabo.

Para el buen funcionamiento de una columna se requiere de la conjunción de 3 factores: adición de energía calorífica por medio de un recalentador para lograr vaporización, remoción de energía calorífica por medio de un condensador para lograr condensación y adecuación de la temperatura del producto alimentado a la columna.

El balance de energía en una columna está dado por la siguiente ecuación:

$$W_f H_f + Q_r = Q_c + W_b H_b + W_d H_d$$

en donde: W_f , W_d , W_b son los flujos (en $L b/H_r$) de alimentación, destilado y fondos;

H_f , H_b y H_d son las entalpías de alimentación, destilado y fondos;

Q_c es el calor removido en el condensador (BTU/H_r)

Q_r es el calor adicionado en el recalentador.

El balance de energía sirve para el cálculo de calor cedido y adicionado a la columna así como también para el dimensionamiento del recalentador y el condensador. La relación de reflujo (V/F) se deriva del balance de energía. Es aquella que relaciona la cantidad de vapor generado por adición de calor del recalentador con la cantidad de fluido alimentado a la columna.

II.4 Variables a ser controladas

Los balances de materia y de energía están agrupando una serie de variables que intervienen de manera relevante en el proceso de la destilación, algunas de las cuales es muy importante que sean controladas de manera estricta.

Las principales variables a ser controladas en una columna son las siguientes:

- a) Flujo de alimentación
- b) Composición de alimentación
- c) Temperatura de alimentación
- d) Presión de la columna
- e) Relación de reflujo
- f) Flujo de destilado
- g) Calor adicionado
- h) Flujo de fondos

a) Flujo de alimentación

El primer paso para efectuar una destilación es determinar qué tipo de producto se desea y en qué cantidad.

Una vez determinado el tipo de separación que se desea llevar a cabo, es necesario establecer una relación entre la cantidad porcentual que se tiene en la alimentación y la cantidad destilada deseada y para tal efecto se establece un balance de materia, en la columna:

$$F = D + B$$

$$F X_f = D X_d + B X_b$$

$$D = \frac{F X_f - B X_b}{X_d}$$

En la industria se requiere de una producción constante diaria o mensual de un producto destilado (D), y por lo tanto la cantidad alimentada a la columna (F) debe ser constante. En el balance se puede observar que una variación en la alimentación afecta de manera directamente proporcional al producto destilado y por lo tanto debe ser controlada exactamente.

b) Composición de alimentación

La composición de la alimentación juega un papel igualmente importante en la destilación.

$$FX_f = DX_d + BX_b$$

$$D = \frac{FX_f - BX_b}{X_d}$$

Un balance de materia demuestra que al haber un cambio en la composición de un producto A en la alimentación, también será diferente la composición del producto B en la misma alimentación y, por lo tanto, habrá variaciones en la cantidad de producto destilado y de fondos por unidad de tiempo. Es importante evitar que ocurra lo anterior, controlando esta variable.

c) Temperatura de alimentación

La mejor manera de observar el efecto que tendría una variación de temperatura de alimentación en el funcionamiento de la columna, es hacer un balance líquido en el plato en que este fluido es alimentado.

$$F = L_{m+1} - L_n + 1$$

$$q = \frac{L_{m+1} - L_n + 1}{F}$$

A partir de este balance se obtiene un factor (q) que - comprende a los términos L_{m+1} (líquido que baja) y $L_n + 1$ (líquido que sube). Este factor (q) describe la condición de la alimentación.

Si $q = 1$: Toda la alimentación entra como líquido a su punto de ebullición.

$q < 1$: Algo de la alimentación es vapor, que crea discrepancia en el balance líquido.

$q = 0$: $WqF = 0$ y la alimentación es vapor en su punto de ebullición.

$q < 0$: WqF es negativa. Significa que se tiene un vapor sobrecalentado y hay menos líquido fluyendo hacia abajo en la sección inferior, que en la superior.

$q > 1$: Se está alimentando un líquido frío. Ocurre lo

contrario al caso anterior.

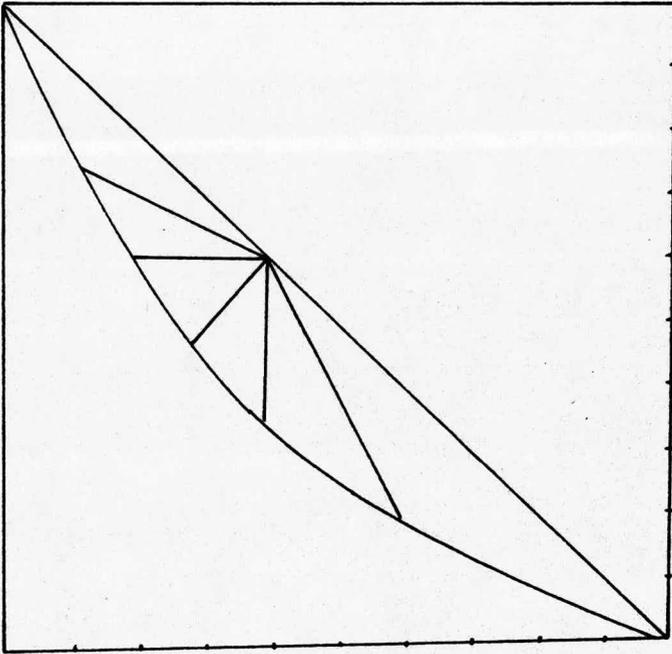
Si se grafica la curva de equilibrio (Como se muestra en la figura 2.3) para algún caso específico de destilación en el cual ya se hayan calculado los valores q anteriores, se pueden obtener unas líneas rectas que, en la gráfica, partirán de un punto representado por la composición de la alimentación e intersectarán a la curva de equilibrio en unos puntos determinados a partir de la siguiente ecuación:

$$Y' = \frac{q}{q-1} X' - \frac{X_f}{q-1}$$

Esta variación afecta principalmente a la línea de operación de la sección de agotamiento y por lo tanto al número de platos que debe haber en esta sección. Por ello es importante un buen control de la temperatura de alimentación.

Eso no quiere decir que la alimentación deba ser forzosamente un líquido cercano a su punto de ebullición. La alimentación puede provenir del almacén, como líquido frío, o bien, de una columna anterior como vapor saturado y si se adecúa previamente la columna a estas circunstancias no existirá problema alguno.

Los problemas se pueden presentar cuando sobre la mar



cha haya alguna variación, puesto que la temperatura de alimentación determina la relación entre la velocidad de vapor y los reflujos en las secciones de enriquecimiento y agotamiento de la columna. Si la alimentación aumentase a una temperatura mayor que el líquido en el nivel de alimentación, se crea un flasheo, el cual causa más velocidad de vapor en la sección de enriquecimiento y se rompe el equilibrio de la columna. Si la temperatura de alimentación baja, se ocasiona un descenso en la velocidad del vapor y se rompe el equilibrio. Por lo tanto su control es muy importante.

d) Presión en la Columna

La presión total de una columna de destilación es un factor que afecta a la separación de dos o más componentes debido a que en ella están involucradas las presiones de vapor de los componentes, y los diagramas de composición para determinar el número de platos y el grado de separación son hechos en base a una presión constante.

Es muy importante controlar la presión en la columna debido a que los puntos de ebullición de los líquidos son sensibles a las variaciones de presión. Esta presión de la columna está generalmente determinada por la aproximación del

punto de burbuja del producto destilado a la temperatura promedio del agua de enfriamiento que se tiene en el condensador.

Si tenemos en el condensador agua de enfriamiento a 80-100°F sería imposible remover el calor latente de condensación de un vapor que está a una presión tal que se condensa a 60°F, en ese caso es necesario elevar la presión de operación y obtener una mayor temperatura de saturación a la cual puede fluir el calor hacia el agua de enfriamiento.

Mientras más alta sea la presión más fácil es condensar pero más difícil es calentar; en este caso, la diferencia de temperaturas será más grande en el condensador y por lo tanto éste será más pequeño. Esto se contrapone con el incremento de costo del reboiler, la columna y el condensador, puesto que deberán ser diseñados para una presión mayor.

De esa manera la presión de la columna va a ejercer una influencia muy directa sobre el condensador y se aprovecha esto para que la cantidad de calor removido, fundamental en el balance de energía de la columna, sea controlada directamente por medio de una medición en la presión del sistema.

El calor removido (Q_c) puede ser calculado a través de un balance de energía en el condensador.

$$Q_c = (R + 1) W_d H_d (v) - (R + 1) W_d H_d (L)$$

Una variación en la presión de la columna va a determinar una mayor o menos admisión de líquido refrigerante al condensador, por lo tanto también es muy importante que la transferencia de calor dentro de este sea buena y para ello se adiciona a la columna un eyector o una bomba de vacío con el objeto de eliminar los gases no condensables que puedan entorpecer esta transferencia.

e) Relación de Reflujo

El reflujo del condensador al plato superior determina dos cosas: la cantidad de destilado y la eficiencia de la columna.

La relación de reflujo L/D , es el factor más importante para el ajuste de la concentración del destilado y el producto del fondo. Un incremento en ella, origina un incremento en la concentración del componente más volátil en el destilado y un decremento de concentración del mismo componente en el producto de fondo. La mayor concentración se obtendría con una relación de reflujo infinita, pero no se obtendría producto alguno ($D = 0$).

El efecto de una variación en el reflujo interno sobre el

sistema puede verse de manera más objetiva con la ayuda de la gráfica 2.4

En ella se observa que si la cantidad de reflujo es incrementada y la concentración del destilado (X_D) permanece fija, la pendiente de la línea de operación para la sección de enriquecimiento aumenta al moverse de 0 a 0':

Al ocurrir lo anterior, el vapor de a es condensado en b' en vez de b y por lo tanto hay un mayor cambio de composición por plato y se requerirá un menor número de platos - para la separación, resultando una columna más baja.

Se debe hacer la aclaración de que mientras mayor sea la cantidad de reflujo y más corta la columna, mayor tendrá que ser el diámetro de la columna y mayor la carga de calor en el recalentador y el condensador. La determinación de la relación de reflujo óptimo es una consideración obtenida por medio de la suma de los costos de operación y los costos fijos del equipo para diferentes relaciones de reflujo y la determinación del mínimo costo de operación como una función de la relación de reflujo.

El reflujo mínimo que se indica en la figura 2.5 se calcula de la siguiente manera:

$$Y_f = \frac{W'_r}{V} X_f + \frac{W_D}{V} X_D$$

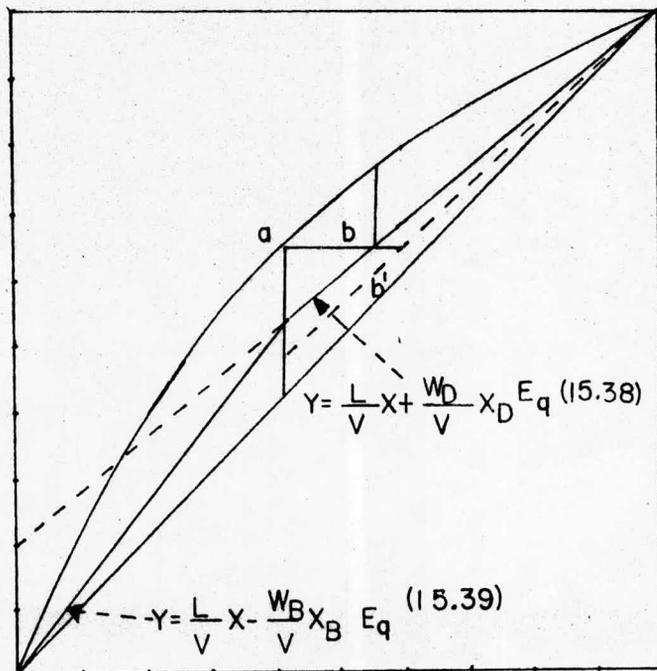


FIGURA 2.4

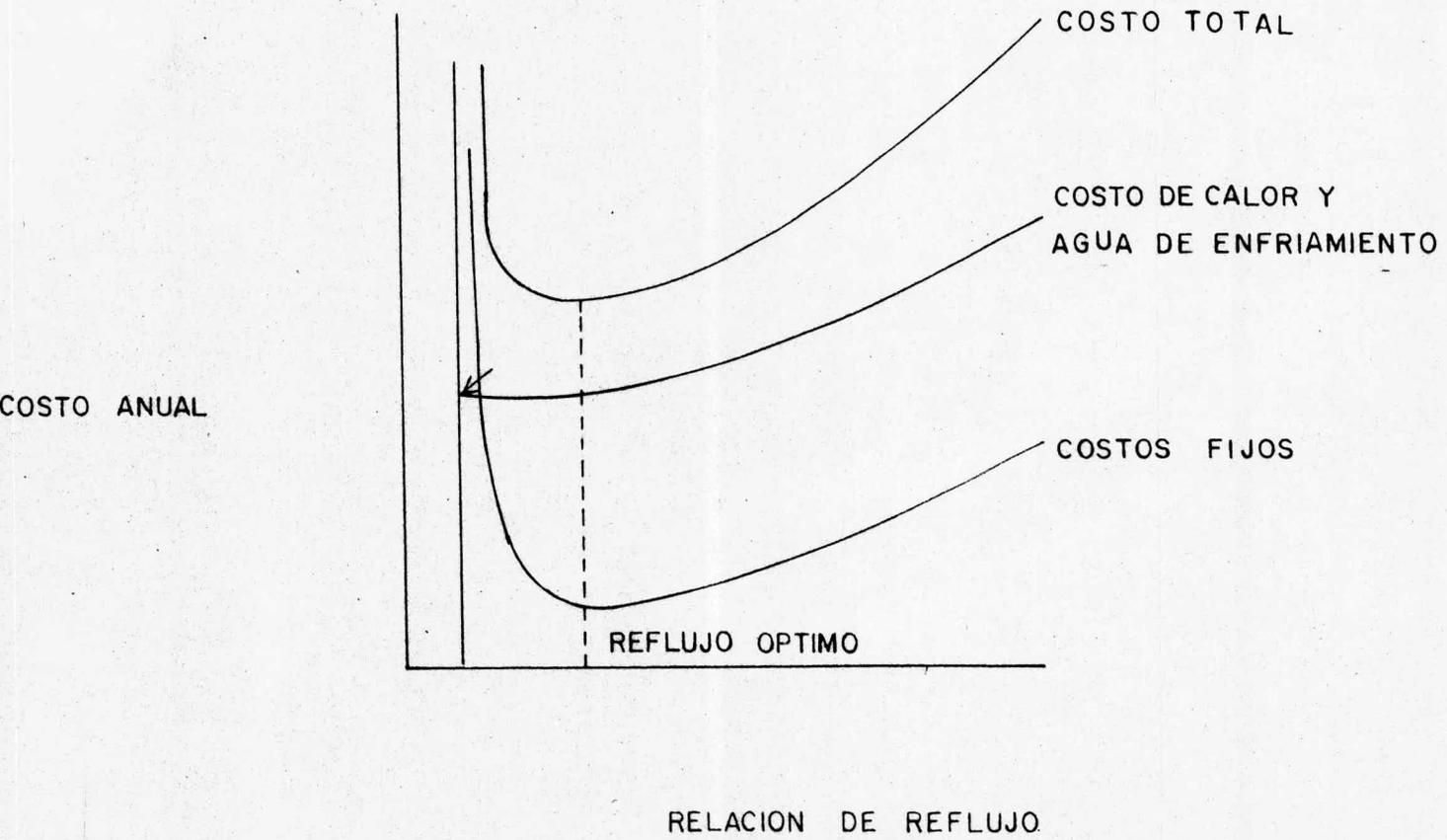


FIGURA 2.5

$$W_d = V - W'_r$$

$$\frac{W'_r}{V} = \frac{X_D - Y_f}{X_D - X_f}$$

en donde W'_r es el total de moles de reflujo a reflujo mínimo.

Por lo antes expuesto, la relación de reflujo es uno de los factores importantes a ser controlados en una columna.

f) Flujo de destilado

Habiéndose hecho un balance de materia previo para el caso específico que se requiera y teniéndose ya una relación de reflujo convenientemente establecida en base a la cantidad y calidad de producto deseadas, se procede a controlar el flujo de destilado requerido por unidad de tiempo, ya que, como se dijo inicialmente, la cantidad de destilado es uno de los indicadores básicos, de los cuales se parte para los cálculos de una destilación y en lo que no se pueden tener diferentes mediciones. Las variaciones de flujo destilado pueden afectar considerablemente a la relación de reflujo previamente calculada, a la producción total de destilado deseada o a algún equipo que esté recibiendo el destilado para su procesamiento.

En el capítulo III se discutirán las diferentes formas de controlar el flujo de destilado.

g) Calor Adicionado

El recalentador tiene como función principal proveer de energía calorífica a la columna de destilación y juega un papel muy importante, puesto que en ella se debe tener en equilibrio entre tres factores:

- La relación de reflujo
- La alimentación
- El calor adicionado

Existen dos tipos de recalentadores: los internos y los externos.

Los internos van insertados directamente en el fondo de la columna y no tienen desventaja desde el punto de vista de transferencia de calor, el único problema que presentan es que los tubos de transferencia de calor deben ser cortos del tamaño del diámetro de la columna, y por lo tanto se requeriría una gran cantidad de ellos y la altura del fondo de la columna aumentaría. Los recalentadores externos son simplemente intercambiadores de calor conectados a la columna en su parte inferior.

Los requerimientos de calor para un recalentador pueden ser determinados a partir de los balances de energía en la columna.

balance en el condensador:

$$(R + 1) W_d H_d (v) - (R + 1) W_d H_d (l) = Q_c \quad (1)$$

balance en la columna entera:

$$W_f H_f (l \text{ ó } v) + Q_r = Q_c + W_b H_b (l) + W_d H_d (l) \quad (2)$$

el balance en el recalentador se obtiene sustituyendo (1) en (2):

$$Q_r = (R + 1) W_d H_d (v) - R W_d H_d (l) + W_b H_b (l) - W_f H_f$$

en donde Q_r = calor cedido por el recalentador en BTU/ H_r

Q_c = calor removido en el condensador

R = relación de reflujo

W_d, H_d = flujo y entalpía de destilado

W_b, H_b = flujo y entalpía de producto de fondo

De lo anterior se desprende que el flujo de vapor que se está alimentando al recalentador debe ser constante, puesto que una variación puede afectar a cualquiera de los términos comprendidos en la ecuación anterior.

Si aumenta o disminuye el calor cedido por el recalentador, habrá un incremento o decremento en la producción de

vapor que asciende a lo largo de la columna que creará un des
equilibrio en el sistema, puesto que el tiempo de contacto va-
por-líquido, en cada plato, variará debido a que el condensa-
dor resulta afectado por esto, y además habrá una descompen
sación en la presión de la columna y en el nivel de líquido
del fondo.

h) Flujo de fondos

Se llama flujo de fondos al flujo de producto condensado que se obtiene en la parte inferior de la columna.

En la mayoría de los casos, el control de este flujo tie
ne por objeto regular el nivel del condensado en el fondo de
la columna, para evitar alguna inundación de ella. En el caso de que el producto de fondos sea el que realmente se desee obtener, el control se basa en otros parámetros diferentes al nivel, los cuales manipulan con mayor sensibilidad este flujo. En el capítulo precedente se hablará de un caso como este.

III. SISTEMAS DE CONTROL

III.1 Introducción al control

En todo sistema de control automático se requieren dos elementos componentes: el proceso y el control automático.

El proceso o sistema controlado, es aquel en el que entran en juego una serie de variables a ser controladas para lograr su funcionamiento óptimo.

El control automático se define como un dispositivo que mide el valor de una variable, lo compara a un valor previamente seleccionado y opera para corregir o limitar la desviación existente entre ellos.

La figura 3.1 ilustra de manera clara algunos de los términos usados en instrumentación. En ella se muestra el empleo de un controlador registrador de temperatura respecto a un recipiente con camisa de vapor en el que se desea calentar agua y mantenerla a una temperatura determinada.

La temperatura del agua es la variable controlada, en tanto que el agua se denomina el medio controlado. El vapor, mediante el cual se calienta el agua, se conoce como el agente de control.

CAPITULO III

SISTEMAS DE CONTROL

CONTROLADOR AUTOMATICO

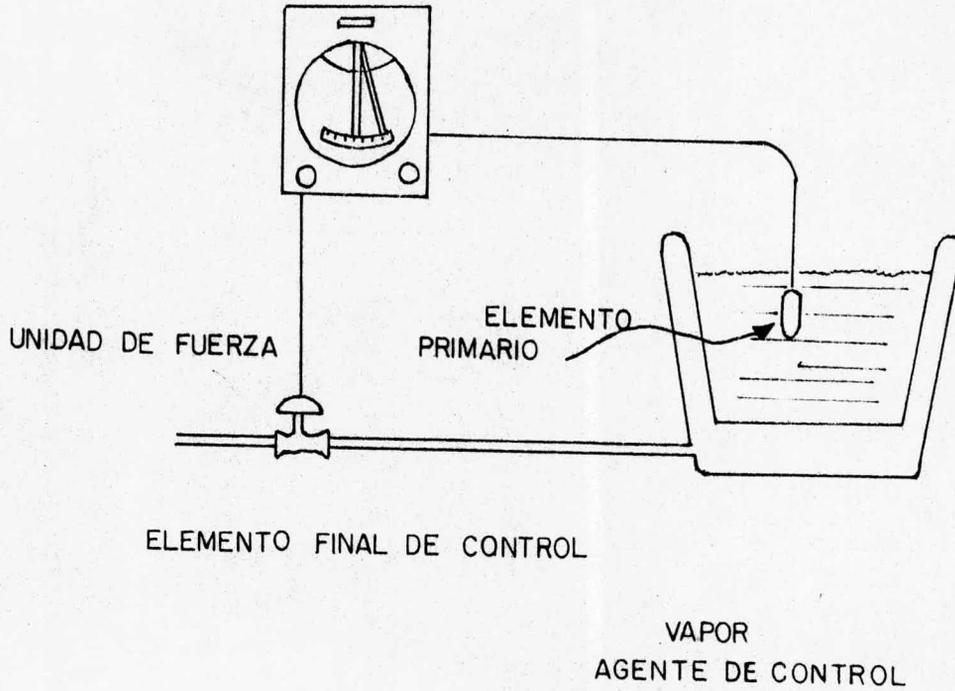


FIGURA 3.1

El bulbo, que se denomina elemento primario, es parte de los medios de medición, de los cuales el tubo capilar es un componente. En el instrumento existen los medios de control que accionan el elemento final de control o sea la válvula de control instalada en la línea de vapor.

El controlador automático generalmente viene equipado con un ajuste para la colocación del punto de control, que determina el valor de la variable controlada en el punto en que se efectúa la acción de control o cerca de él.

Todos los sistemas de control automático se basan en la idea fundamental de retroalimentación.

En la figura 3.2 se indica cómo las condiciones de salida en un proceso quedan retroconectadas para controlar las de entrada. La desviación que sufre el proceso en la salida con respecto al valor correspondiente al punto de control, es medida por los medios de medición del instrumento, el cual compara el valor medido con el valor al que se ha fijado el punto de control y transmite a los medios de control una señal correspondiente a la diferencia.

Los medios de control aplican una acción correctiva al elemento final de control, el cual efectúa la corrección necesaria a la entrada para establecer el valor de salida al punto

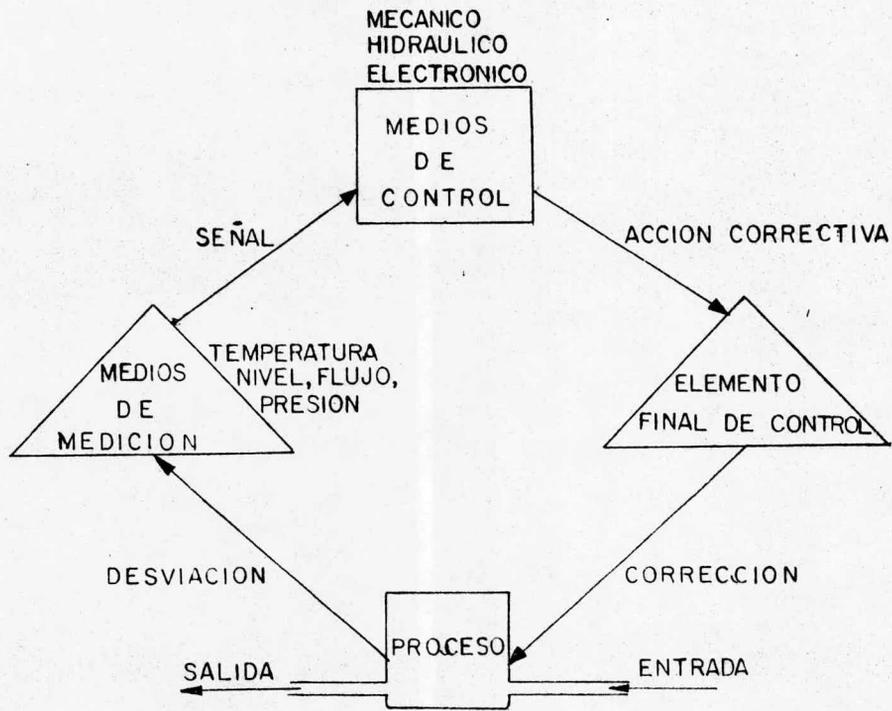


FIGURA 3.2

deseado de control.

Así se ve que los instrumentos no controlan el proceso; pero al conectar el proceso y los instrumentos en un ciclo completo, el proceso se controla por sí mismo.

III.2 Terminología de control

Todo sistema de control se representa gráficamente por medio de un diagrama de flujo de instrumentos en el cual se muestran los diferentes instrumentos, las conexiones entre ellos y otros componentes, la nomenclatura de los instrumentos y el modo en que está funcionando.

A. Los instrumentos se representan de la siguiente manera:



Instrumento instalado en campo



Instrumento instalado en el tablero de control.



Instrumento instalado en la parte posterior del tablero de control.

B. Las conexiones entre instrumentos y líneas de pro

ceso o componentes se representan en esta forma:

_____ conexión a proceso o abastecimiento
al instrumento.

— // // — señal neumática

- - - - - señal eléctrica

— X X — tubo capilar

— L L — señal hidráulica

— ~ ~ ~ — señal electromagnética o sónica

- C. La nomenclatura que va circunscrita dentro de los círculos que representan a los instrumentos, se co
difica de la siguiente manera:

<u>PRIMERA LETRA</u>	<u>LETRAS PROCEDENTES</u>
A Análisis	Alarma
B Flama de quemador	A elección del usuario
C Conductividad	Controlador
D Densidad o gravedad	No clasificada
	específica.

E	Voltaje	Elemento primario
F	Flujo	No clasificada
G	No clasificada	Mirilla
H	Manual	No clasificada
I	Corriente eléctrica	Indicador
J	Poder	No clasificada
K	Tiempo	Estación de control
L	Nivel	Luz
M	Humedad	No clasificada
N	A elección del usua- rio.	A elección del usuario
O	A elección del usua_ rio.	Orificio (restricción)
P	Presión o vacío	Punto (conexión de prue_ ba)
Q	Cantidad	No clasificada
R	Radioactividad	Registrador
S	Velocidad o frecuen- cia.	Switch
T	Temperatura	Transmisor
U	Multivariable	Multifunción

V	Viscosidad	Válvula
W	Peso	Pozo
X	No clasificada	No clasificada
Y	A elección del usua- rio.	A elección del usuario
Z	Posición	Actuador

D. El modo de función se codifica de la siguiente forma:

<u>SIMBOLO</u>	<u>FUNCION</u>
$O_n - O_{ff}$	Abre o cierra únicamente
Σ	Suma o totaliza
Δ	Resta
% ó 1:3, 2:1	Ganancia o atenuación (entrada: salida)
x	Multiplica
\div	Divide
$\sqrt{\quad}$	Extrae raíz cuadrada
x^n ó $x^{1/n}$	Eleva una potencia
f(x)	Caracteriza

$>$	Selecciona la más alta variable medida
$<$	Selecciona la más baja variable medida
E / P ó P / I	Convierte
\int	Integra
D	Deriva
1/D	Deriva inversamente

III.3 Sistemas de control básicos

Después de una breve revisión de conceptos básicos de instrumentación y su representación gráfica, se verán las diferentes formas de instrumentar una columna de destilación.

Un sistema completo de control está formado por componentes que controlan las variables en diversos puntos de la columna de destilación, como se discutió en el capítulo anterior; pero siempre hay una variable en un punto de la columna que por sus características especiales marca la pauta a seguir y es la base sobre la que descansa el sistema. Esta variable puede ser diferente para otros equipos o procesos pero para el caso de la destilación es la temperatura en cada plato.

El objetivo de un sistema de control de una columna de destilación es mantener el grado de separación deseado entre el producto destilado y el de fondos. Se hizo necesario encontrar una variable que representara a esta separación y durante mucho tiempo se eligió a la temperatura debido al alto costo de los analizadores continuos y al problema que implicaba el tiempo de atraso en la toma y análisis de la muestra. En la actualidad ya se permite el uso de analizadores debido a que la tecnología ha ido avanzando y se ha logrado reducir el costo y el tiempo de atraso hasta en 3 segundos.

El grado de separación en una columna es muy sensitivo a la presión y temperatura que se tienen en cada plato de ella, sin embargo la temperatura no muestra la sensitividad que la presión demuestra hacia los gases no condensables, y por lo tanto la temperatura ha sido usada en la mayoría de aplicaciones como punto básico.

En el establecimiento de un sistema, el objetivo es identificar una temperatura en alguna posición particular de la columna, la cual, si se mantiene constante conservará la separación a pesar de variaciones en la composición de la alimentación o cambios en el flujo.

Con el objeto de analizar la sensibilidad a la temperatura, se efectúan dos pruebas sobre una columna operando en estado estable en la cual se provocará el cambio en una variable. Por ejemplo, en un caso se aumenta 5% el destilado y en el otro caso se disminuye 5%. Como se muestra en la figura 3.3).

Los resultados de temperatura para cada plato o etapa muestran que se forma un nodo en el fondo de la columna cerca de la etapa 7 y un nodo más pequeño en la parte superior cerca de la etapa 13. La temperatura cambió considerablemente en respuesta a la variación de destilado y se puede decir que esta variable es capaz de detectar anomalías en el funcionamiento y por lo tanto es ideal para fines de control.

Se puede hacer la misma prueba pero ahora respecto a los cambios de concentración en cada etapa y se observará un resultado similar al anterior, como lo demuestra la figura 3.4

Si se obtiene un perfil de variación en la temperatura con respecto a su estado inicial en el estado estable, se puede concluir que el control del sistema tenga como base el plato 13.

Los cuatro sistemas básicos más exitosos, y por lo tanto más frecuentemente usados, se basan en un control logrado por

NUMERO DE
ETAPA

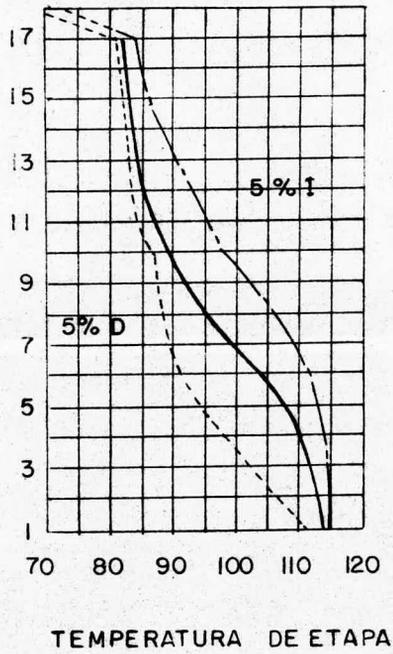
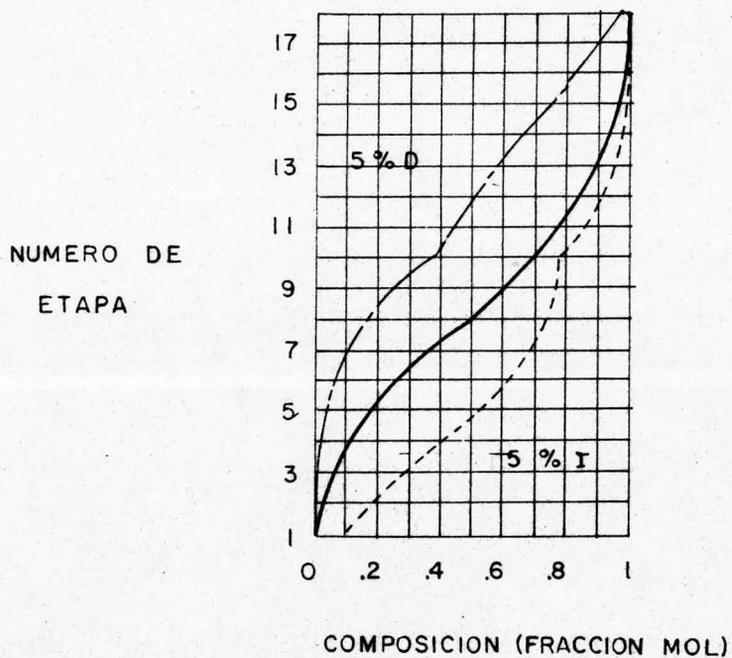


FIGURA 3.3



FIGURÁ 3.4

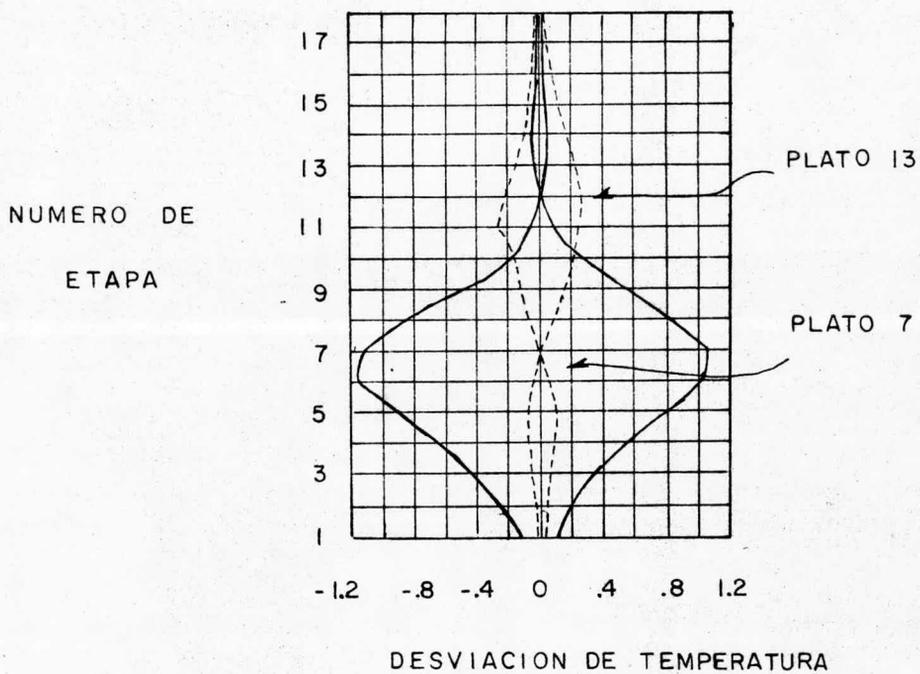


FIGURA 3.5

medio del manejo directo o indirecto del balance de materia.

A continuación se indican:

- 1) Control de destilado por medio de un balance de materia directo.
- 2) Control de fondos por medio de un balance de materia directo.
- 3) Control de reflujo por medio de un balance de materia indirecto.
- 4) Control de vapor por medio de un balance de materia indirecto.

Los balances de materia directos son aquellos que ajustan un flujo que sale de la columna: destilado o fondos.

Los balances de energía o de materia indirectos son aquellos que afectan al balance de energía directamente, lo cual resulta en un cambio de flujo que sale de la columna.

1. CONTROL DE DESTILADO POR MEDIO DE BALANCE DE MATERIA DIRECTO.

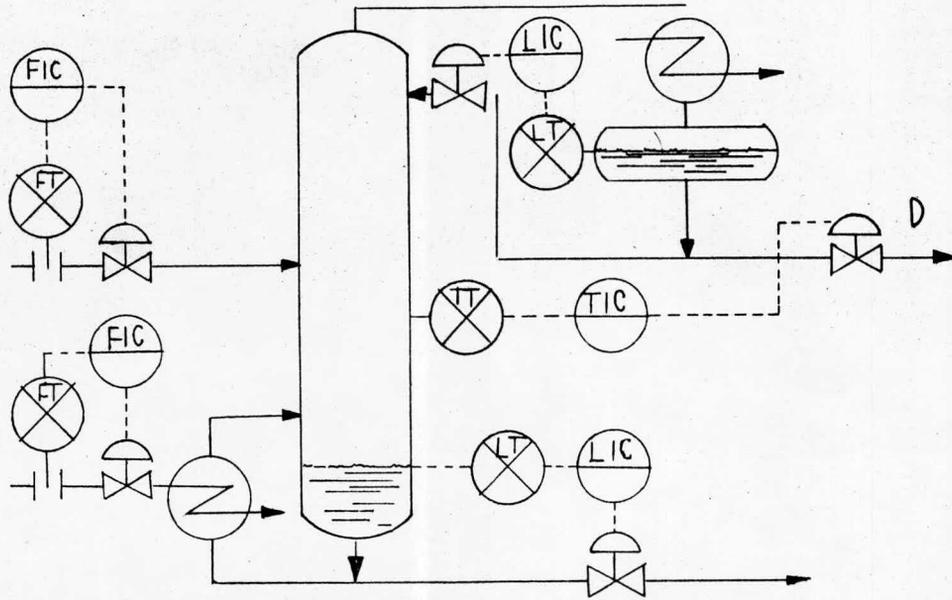
El diagrama que se muestra en la figura 3.6 representa a este sistema de control. En él se puede observar que el flujo de destilado se está regulando directamente a través de un controlador indicador que toma los cambios de temperatu-

ra en un plato determinado y manda una señal proporcional a ellos, de acuerdo a los modos de control usados, a una válvula que maneja el destilado.

El flujo de fondos, que en este caso se supone menos importante, está regido por el nivel de condensado en la parte inferior de la columna, y para tal efecto se instala un controlador indicador de nivel que manda una señal proporcional a una válvula que maneja los fondos. Esta válvula está calculada a modo de dar salida únicamente a la porción que se desea extraer y la porción restante es enviada nuevamente a la columna, pasando a través del recalentador.

Los flujos de alimentación a la columna y de vapor al recalentador se regulan directamente por medio de sus respectivos controladores indicadores de flujo, los cuales son calibrados a un punto de ajuste requerido de acuerdo al balance de materia previamente calculado.

La válvula que maneja el reflujo de destilado a la columna, recibe una señal de un controlador indicador que está regulando el nivel de líquido en el acumulador. Esto no implica que se esté menospreciando la relación de reflujo, tan importante para cada columna, es necesario remarcar que la rela-



BALANCE DE MATERIA DIRECTO

CONTROL DE DESTILADO

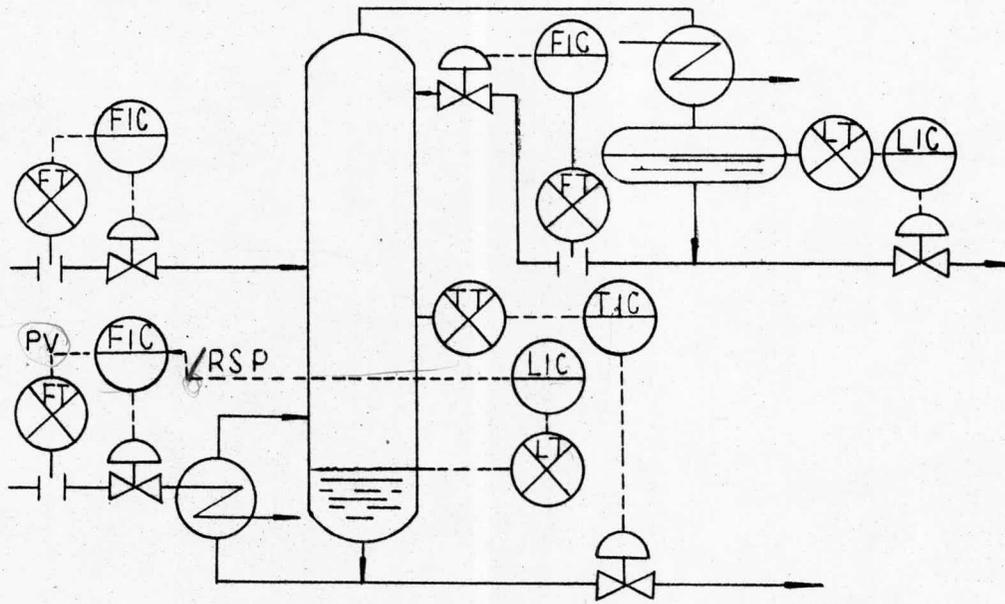
FIGURA 3.6

ción de reflujo ya está determinada por la cantidad de destilado que sale de la torre, la cual, a su vez, es controlada por la temperatura interior de la columna.

2. CONTROL DE FONDOS POR MEDIO DE BALANCE DE MATERIA DIRECTO.

Este tipo de sistema se emplea en aquellos casos en que el producto más importante en la separación es el más pesado, o sea, el que se obtiene en la parte inferior de la columna.

El control se ejerce directamente en los fondos por medio de un controlador indicador que mide la temperatura en el plato de la columna y envía una señal a la válvula que controla ese líquido. Se puede observar que generalmente el control de salida de fondos, se efectúa por medio del nivel de éstos dentro de la torre, pero en éste caso, la válvula encargada de regular tal flujo está funcionando en base a la temperatura, y por lo tanto, se tendrá que hacer alguna modificación que permita el control de nivel de la columna. Esta modificación consiste en enviar la señal del controlador indicador de nivel al controlador indicador de flujo de vapor al recalentador, aprovechando la relación existente entre la energía calorífica inyectada a la columna y la cantidad de condensado en el



BALANCE DIRECTO DE MATERIA

CONTROL DE FONDOS

FIGURA 3.7

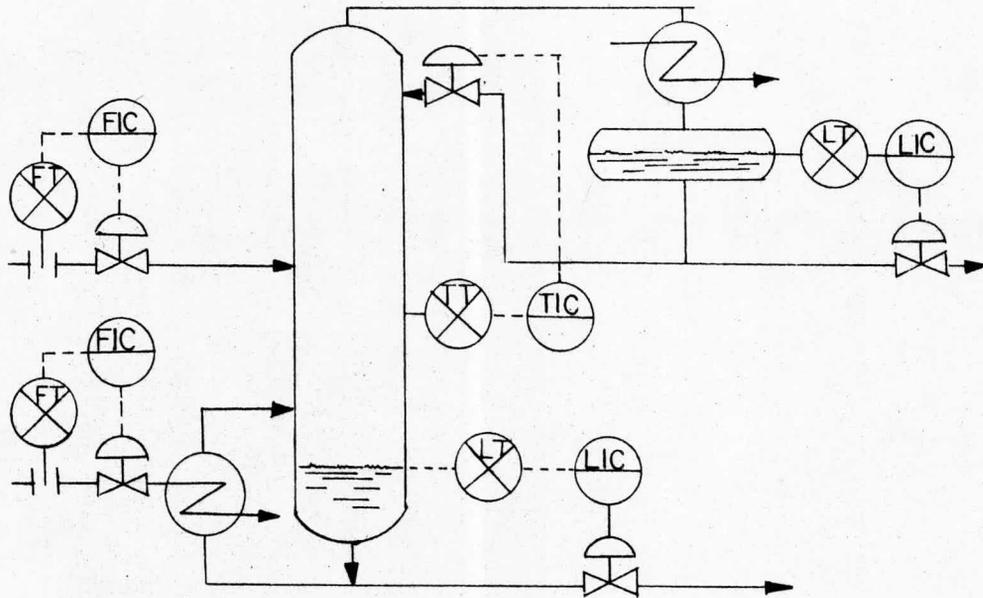
donde en ésta. En este caso tenemos un sistema de control en cascada, en donde la salida del controlador de nivel es el punto de ajuste del controlador de flujo. Con eso se logra mantener un nivel constante en el fondo de la columna.

La alimentación a la columna se regula por medio de un controlador indicador de flujo, calibrado a un punto de ajuste determinado, el cual envía una señal proporcional a la válvula de control.

Un controlador indicador de flujo se encarga de mantener una relación fija de reflujo de destilado a la columna, y el flujo de destilado al exterior de la columna se regula a través de un controlador indicador que supervisa el nivel de líquido en el acumulador.

Si comparamos este sistema de control con el que se expuso en el caso 1, se puede observar que aquí sucede lo contrario: el producto de fondos es el más importante y está controlado por la temperatura y el destilado es secundario y por lo tanto, únicamente está regulado a través del nivel del líquido.

3. CONTROL DE REFLUJO POR MEDIO DE BALANCE DE MATERIA INDIRECTO.



BALANCE DE MATERIA INDIRECTO
CONTROL DE REFLUJO

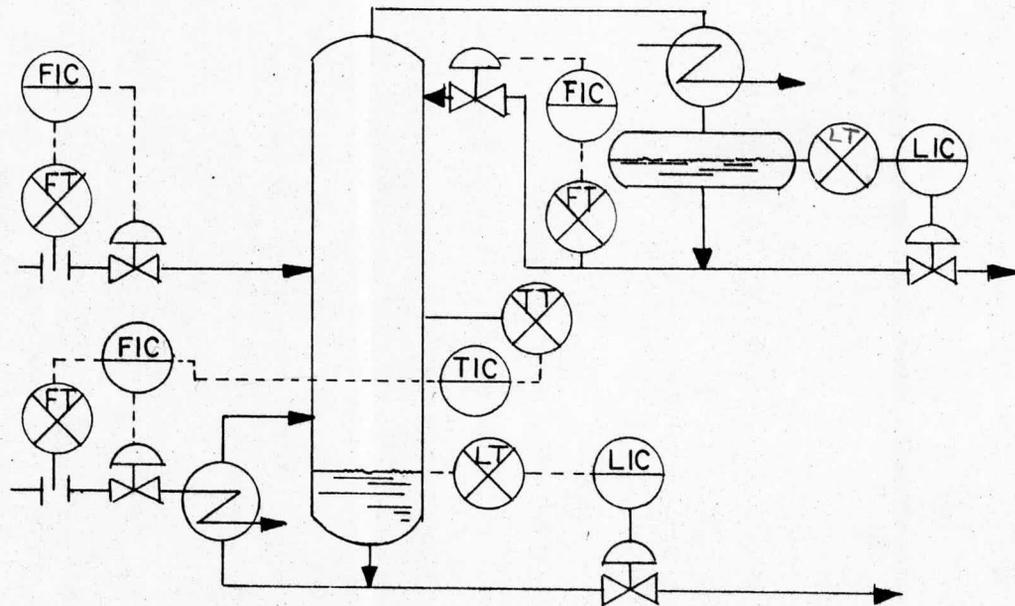
FIGURA 3.8

Este sistema de control proclama a la relación de reflujo como el factor más importante a ser controlado en forma exacta, y para ello el controlador indicador de temperatura, cuya importancia se remarcó anteriormente, es conectado directamente a la válvula que regula el reflujo de destilado a la columna. Como se muestra en la figura 3.8.

La admisión de alimentación a la columna y vapor al recalentador se regulan por medio de sendos controladores indicadores de flujo ajustados, el primero de acuerdo al balance general de materia y el segundo en base a la cantidad de condensado que se recircule a través del calentador.

Es curioso observar cómo en este sistema de control, los flujos de destilado y de fondos son controlados únicamente en base al nivel de líquido existente en el acumulador y la parte inferior de la columna. Un ejemplo claro de un balance de energía o de materia indirecto. Este sistema ha demostrado ser exitoso, sin embargo, debido a la importancia que actualmente tiene el control de energía en una planta, ha sido desplazado por el control directo del balance de materia.

4. CONTROL DE VAPOR POR MEDIO DE BALANCE DE MATERIA INDIRECTO.



BALANCE DE MATERIA INDIRECTO

CONTROL DE VAPOR

FIGURA 3.9

En este tipo de sistema se da mucha importancia al control de vapor y por ello se tiene un sistema de control en cascada entre la temperatura dentro de la columna y el flujo de vapor al recalentador. Se tiene como control secundario el flujo de vapor y como primario el control de temperatura. La respuesta del control secundario debe ser más rápida que la del primario, para asegurar una buena cascada.

La alimentación y relación de reflujo a la columna se regulan directamente por medio de controladores indicadores de flujo. Como se muestra en la figura 3.9.

Por último, los flujos de destilado y de fondos se controlan de manera indirecta, o sea a través del nivel de condensado en el acumulador y en la parte inferior de la columna.

Los cuatro sistemas vistos anteriormente son bastante confiables y ampliamente usados en la industria en todos aquellos casos en que se desea una buena separación de los componentes alimentados a la columna, aunada a la obtención de un flujo constante de destilado.

III.4 Sistemas de control predictivo "FEEDFORWARD"

El sistema de control predictivo, comúnmente llamado por su nombre inglés "Feedforward", fué desarrollado recientemente

te con el fin primordial de obtener:

- a) Una máxima separación
- b) Una separación constante

Su meta es la obtención de un producto destilado de muy alta calidad, siendo secundaria la cantidad de destilado que se logre por unidad de tiempo, a diferencia de los sistemas anteriores que fijan una determinada cantidad de producto y en base a ella buscan la mejor separación posible.

Este sistema "Feedforward" se basa en la medición del flujo alimentado y su composición sin controlarlos, y por medio de ello anticipar los cambios que en la columna de destilación se presenten para compensar esa variación en la alimentación. Es ideal para emplearse en sistemas complejos y en aquellos casos que se tenga una composición de alimentación muy variable.

A continuación se explica su principio.

Supóngase que se va a efectuar una separación de alcohol etílico y agua. Se hace un balance de materia para obtener la cantidad de destilado D .

$$D = F \frac{(X_f - X_b)}{(X_d - X_b)}$$

Se desea obtener la máxima separación posible y por ello es válido asumir que no hay residuos de alcohol etílico en el producto de fondos de la columna.

$$X_b = 0$$

$$D = F \frac{X_f}{X_d}$$

$$D = K_d F X_f$$

K_d es una constante equivalente a la inversa de la concentración de alcohol etílico en el destilado.

La máxima separación, que el sistema feedforward establece como primera premisa, va estar regulada por esta última ecuación y posteriormente se verá sobre un diagrama de Feedforward cómo se aplica ésta.

La segunda premisa que se establece es la separación constante y se ha demostrado que ésta puede obtenerse a través de la manipulación de tres variables que son:

- a) La cantidad de vapor al recalentador
- b) La alimentación
- c) La relación de reflujo;

las cuales están relacionadas a través de las siguientes ecuaciones:

$$\frac{V}{F} = K$$

$$V = KF$$

El Ing. Fenske de la Universidad de Pensylvania encontró una relación entre el vapor que entra a una columna y la alimentación a ella y evolucionó el control en columnas en base a esta función. También se ha demostrado que para mantener una separación constante se deben observar las siguientes ecuaciones:

$$L = K_1 D$$

$$V = D + L$$

Por su mayor exactitud en el control de las variables en una columna de destilación y por representar el último avance tecnológico en esta materia, se eligió en este trabajo al sistema Feedforward o de retroalimentación para ser revisado en una forma más detallada, haciéndose un análisis técnico y económico de sus componentes individuales.

A. SEPARACION CONSTANTE

La ecuación que representa a la separación constante se puede escribir en forma más simplificada como a continuación se indica:

$$D = m F Z$$

en donde m representa la retroalimentación y funcionará como factor de corrección por la imperfección del modelo "Feedforward", F es el flujo de alimentación y Z es su composición.

El uso del Factor de corrección es debido a que la separación nunca es completa y por lo tanto es necesario introducir un término que refleje la ineficiencia de la separación dentro de la columna de destilación.

En la figura 3.10 se ilustra el modelo "Feedforward" referido y se puede observar que en el loop 1 se tiene un analizador de composición de alimentación en línea, cuya señal es enviada a un elemento de computación que la multiplica por el flujo de alimentación detectado por el transmisor de flujo, cuya señal es linearizada por el extractor de raíz cuadrada (loop 2)

El factor de corrección ' m ' es introducido empleando un controlador de temperatura que recibe señal de un transmisor (loop 3), que tiene el elemento primario de medición en el plato que proporcione óptima medición del comportamiento de la separación en la columna. La señal de salida del controlador de temperatura, TIC-3, se suma a la señal que sale del mul

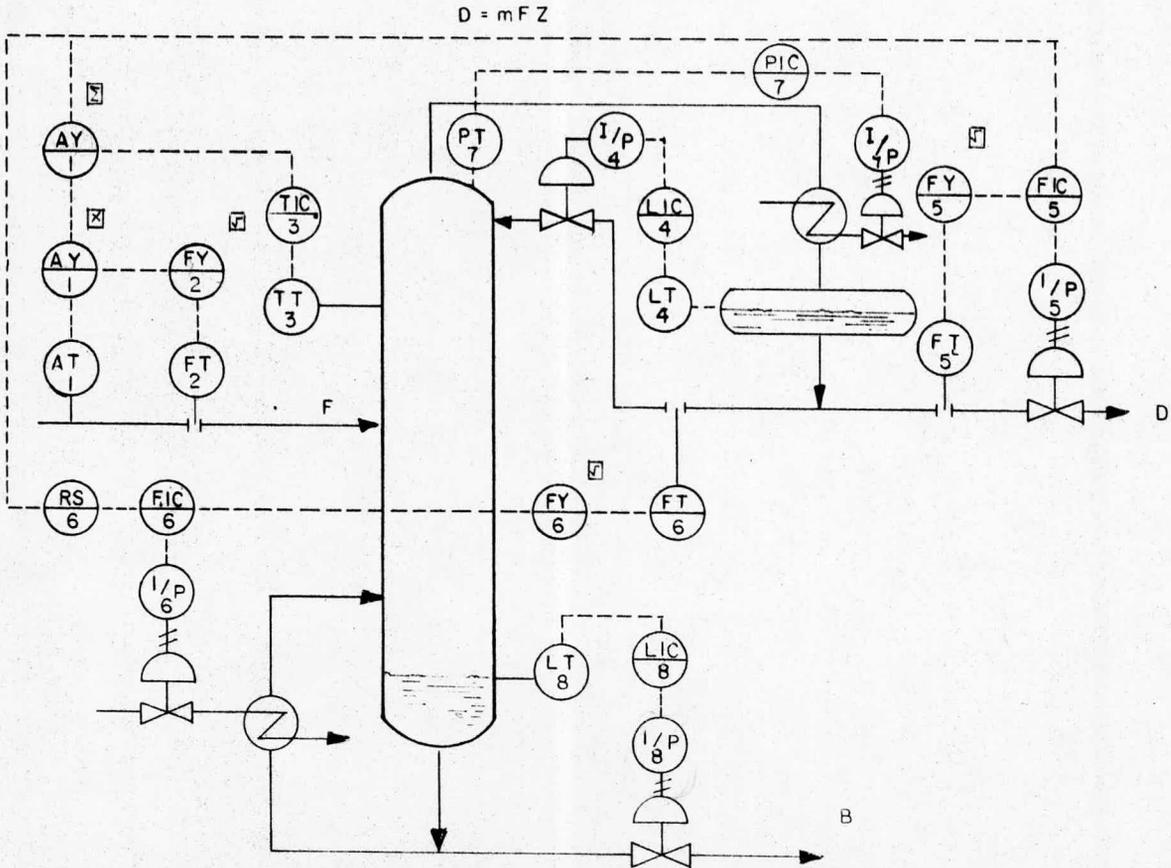


FIGURA 3.10

tiplicador indicado en el loop 1, con el objeto de desarrollar la ecuación $D = m F Z$.

El resultado de esa ecuación es el punto de ajuste para el control de flujo de destilado, es por ello que se manda la señal al controlador FIC - 5, el cual a su vez está recibiendo la señal de su transmisor de flujo (loop 5) y la compara con el punto de ajuste mencionado.

La modificación del flujo de vapor se efectúa por medio de una estación de relación, RS-6, que recibe información del flujo de destilado, que fué calculado por la ecuación del modelo "Feedforward". La salida de la estación RS-6 es el punto de ajuste del controlador de flujo de vapor FIC-6 (loop 5).

El nivel de líquido en el condensador se regula por medio de un transmisor y un controlador de nivel (loop 4), que envían señal a una válvula de recirculación a la columna.

La presión interna de la columna es supervisada por un transmisor y un controlador de presión (loop 9), que envían una señal a una válvula neumática que regula la salida de líquido de enfriamiento del condensador.

Por último, el nivel en el fondo de la columna es regulado por una válvula neumática que recibe señal de un trans-

misor y un controlador de nivel.

Es importante hacer notar que todas las válvulas de control empleadas son neumáticas y por lo tanto es necesario que haya transductores electro-neumáticos (I/P) que se encargarán de convertir la señal eléctrica de los instrumentos en señal neumática. También hay que tomar en cuenta que todas las señales de flujo han sido linearizadas con extractores de raíz cuadrada.

Hasta aquí se ha considerado que los sistemas presentados son de separación constante. Esto es, se desea mantener la separación a un valor constante debido a que los valores económicos del producto destilado y del fondo están relativamente cerca el uno del otro.

B. MAXIMA SEPARACION

En muchas destilaciones un producto es de más valor que el otro y se requieren sistemas de control diseñados para maximizar la corriente más valiosa. Entonces, la ecuación de control más común para este tipo de sistema es:

$$D = m (KF + K_2 F^2)$$

en donde, D = Destilado

F = Flujo de alimentación

K = Coeficiente ajustable

$$K_2 = 1 - K$$

m = Retroalimentación

El modo de control para un sistema de máxima separación se muestra en la figura 3.11

Un constante reflujo es extremadamente importante para mantener un comportamiento de la composición dentro de la columna. Variaciones bruscas en el reflujo causarán oscilaciones durante un largo período de tiempo. Esta es la principal razón por la que la mayoría de las columnas son actualmente operadas con un constante reflujo.

Si el flujo destilado es la variable manipulada para controlar la composición, el reflujo será una variable dependiente. Por eso frecuentemente en los sistemas de control directo del balance de materia, el reflujo es manipulado por el control de nivel del acumulador. Sin embargo, además del problema que significa el control de nivel de vapor condensado, debido a los problemas termales y de transporte, existe otro que es el atraso en el acumulador, ya que:

- a) El balance de materia es el plato de arriba es el que determina qué perfil de composición se tendrá

$$D = m \cdot (K_F + K_2 F^2)$$

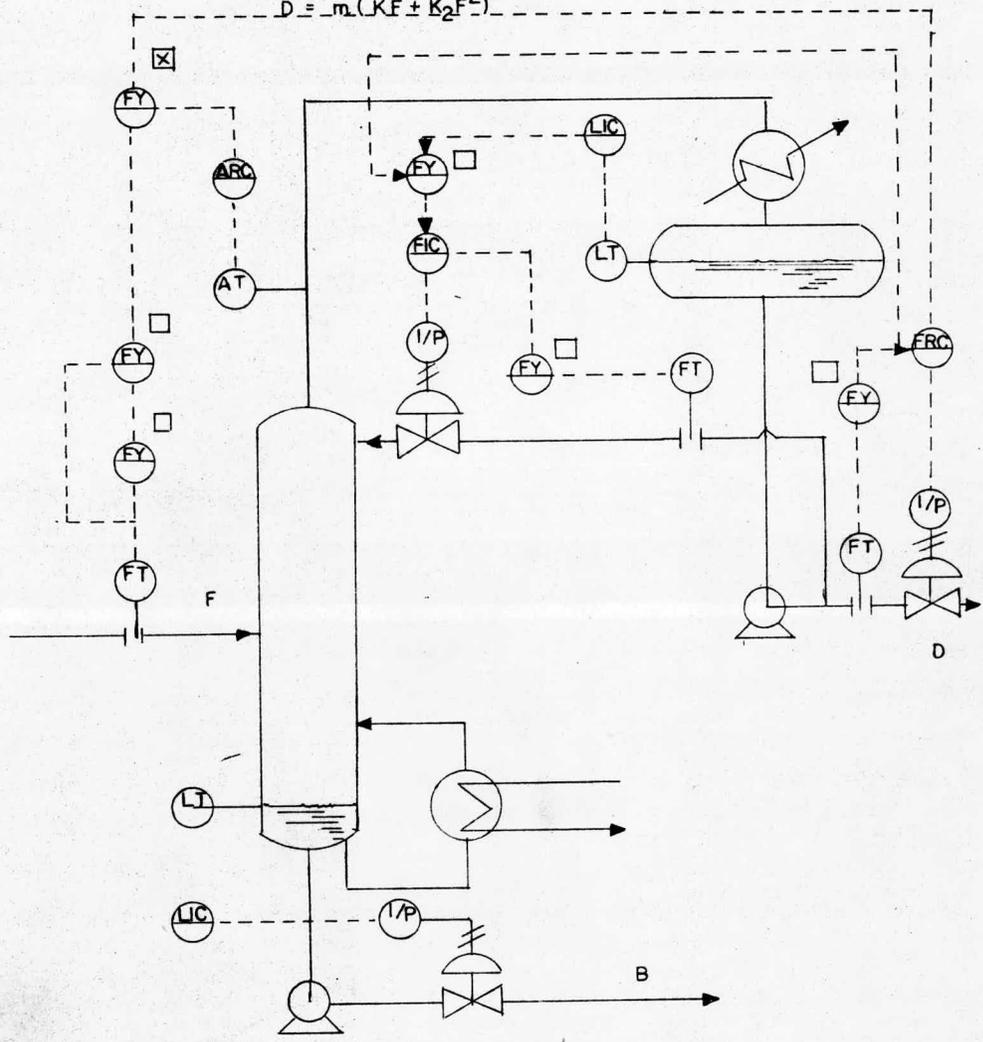


FIGURA 3.11

saliendo de la columna.

- b) Un cambio en el flujo de destilado D no tiene ningún efecto en la composición si el reflujo L o el vapor V no son alterados de acuerdo a la variación en D .
- c) El control de nivel manipulando directamente el reflujo, lo modificará hasta que exista un error en el nivel ajustado, lo que significa un gran tiempo de atraso del acumulador.

De esta manera, la capacidad del acumulador puede impedir de un modo significativo el control de composición.

Si el reflujo se ajustara para que respondiera a la misma señal de control que el destilado, el tiempo de atraso del acumulador puede ser eliminado. Con este arreglo, una disminución en reflujo ocurre simultáneamente con un incremento en flujo destilado y el nivel del acumulador puede permanecer constante.

$$V = L + D$$

Si V es verdaderamente constante y las computaciones y manipulaciones de flujo son exactas, no se requiere control de nivel del acumulador. Sin embargo, en la práctica esto no

es posible y es necesario introducir una retroalimentación que efectúe correcciones por las imperfecciones existentes en nuestro sistema (L_c). La ecuación queda así:

$$L = L_c - K D$$

en donde, L = Reflujo

L_c = Retroalimentación. Corresponde a la salida del controlador de nivel LIC-9

K = Coeficiente ajustable 0 a 1

D = Destilado

Mucho más se puede lograr si se hace que el reflujo disminuya más que un incremento en el flujo de destilado. Lo anterior ocasionaría un aumento en el nivel del acumulador, desviándose del punto de ajuste del controlador LIC-9 el cual, al detectar el error, hará que el reflujo retorne a su correcto valor de operación. Pero la acción de adelanto ha sido introducida en el balance de materia del plato superior, aumentando la rapidez del loop de composición de una manera significativa. De hecho el acumulador ha sido convertido de una desventaja en una ventaja, de un atraso en un adelanto.

El coeficiente K ajusta la relación de adelanto/atraso. Se haría necesario usar un elemento de adelanto/atraso en el sistema propuesto entre el extractor de raíz cuadrada FY-5

y el sumador FY-5.

El sistema de control de máxima separación es tan eficiente como el de separación constante, pero es muy importante emplearlos propiamente, puesto que cada uno de ellos tiene una aplicación específica.

El sistema Feedforward, llevado a cabo con instrumentación análoga, es ideal para lograr una máxima separación o una separación constante y con él se logran operaciones con una reducción de energía de 15%.

Si aún después de ese ahorro se desea una optimización completa, se puede agregar al sistema una computadora digital que trae consigo las siguientes ventajas:

- a) Una mejor rangeabilidad
- b) Mayor flexibilidad para cambios o adiciones en un sistema de control.
- c) Niveles más altos de control
- d) Facilidad de entrenamiento y supervisión
- e) Mayor información y documentación para ingenieros y operadores.

La computadora digital es un equipo al cual se alimentan los datos necesarios para lograr una inter-relación completa

entre sistemas complejos hasta alcanzar su optimización. Ha tenido resultados exitosos en el control de sistemas complejos o muy variados y su revisión requiere de un estudio completo y detallado que no se pretende realizar en este trabajo, únicamente se hace mención de ella porque representa el último avance en el terreno de la instrumentación electrónica.

RELACION DE INSTRUMENTOS EMPLEADOS

(AT)	ANALIZADOR-TRANSMISOR DE COMPOSICION
(FT)	TRANSMISOR DE FLUJO
(FIC)	CONTROLADOR INDICADOR DE FLUJO
(FY)	ELEMENTO SUMADOR DE FLUJO
(FY)	ELEMENTO EXTRACTOR DE RAZ CUADRADA DE FLUJO
(FRC)	CONTROLADOR REGISTRADOR DE FLUJO
(TT)	TRANSMISOR DE TEMPERATURA
(TIC)	CONTROLADOR INDICADOR DE TEMPERATURA
(LT)	TRANSMISOR DE NIVEL
(LIC)	CONTROLADOR INDICADOR DE NIVEL
(PT)	TRANSMISOR DE PRESION
(PIC)	CONTROLADOR INDICADOR DE PRESION

RS

ESTACION DE RELACION

I/P

TRANSDUCTOR ELECTRO-NEUMATICO

CAPITULO IV

SELECCION DE ELEMENTOS
DE CONTROL

IV. SELECCION DE ELEMENTOS DE CONTROL

IV. Elementos integrantes del sistema

En la sección anterior se vió que el sistema Feedforward o de retroalimentación es muy completo y se presentaron algunas formas de arreglar la instrumentación de acuerdo a él.

En este capítulo se pretende revisar técnicamente a cada uno de los instrumentos que forman parte del sistema mencionado y para ello se tomará como muestra el arreglo que se propone en la figura 3.10 para la obtención del destilado.

A continuación se presenta una lista de ellos:

<u>Loop</u>	<u>Función</u>	<u>Modelo</u>
1	XA	
1	L/L	TL-176
1	X	TL-172
1	X	TL-172
2	FT	1 151-DP
2		TL-171
3	TT	PM-501
3	TIC	TL-101
4	TL	1 151-LL

4	LIC	TL-101
4	E/P	546
5	FT	1 151-DP
5	√	TL-171
5	FIC	TL-101
5	E/P	546
6	FT	1 151-DP
6	√	TL-171
6	R	TL-142
6	FIC	TL-101
6	E/P	546
7	PT	1 151-GP
7	PIC	TL-101
7	E/P	546
8	LT	1 151-LL
8	LIC	TL-101
8	E/P	546

El grupo total de instrumentos que intervienen en la columna de destilación fué dividido en subgrupos llamados loops para facilitar su análisis técnico y económico y es por esto que en la primera columna se anota el número de loop al cual.

pertenece cada uno.

En la segunda columna de la relación se indica el tipo de función que desempeña cada elemento.

Esta sección del trabajo requiere de una revisión más precisa y es por ello que se tuvo que escoger para su evaluación alguna de las varias marcas de equipo de instrumentación que existen en el mercado. Se eligió el equipo electrónico Fisher por su alta calidad y por representar ventajas tanto técnicas como económicas y a eso se debe que en la tercera columna aparece el modelo correspondiente a dicha firma.

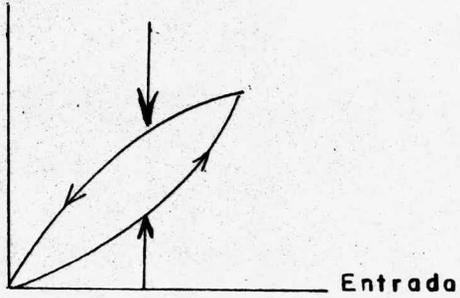
IV.2 Algunos conceptos básicos de control.

Pero antes de iniciar ese análisis técnico individual es necesario definir ciertos conceptos de instrumentación que se mencionarán en él.

Loop de control es un conjunto de instrumentos que tienen diferente función pero que intervienen en forma seriada en la medición y control de una variable de proceso.

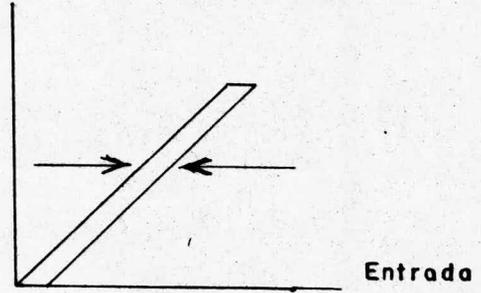
Control en cascada es aquella acción de control en donde la salida de un controlador funciona como punto de ajuste para otro controlador. El loop secundario debe responder más

Salida



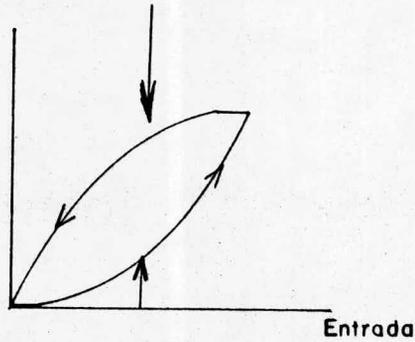
ERROR . HISTERETICO

Salida



BANDA MUERTA

Salida



HISTERESIS

FIGURA 4.1

rápidamente que el primario.

Span es la diferencia algebraica existente entre el valor superior y el valor inferior del rango de control.

Linealidad es una característica que define la señal de salida de un instrumento y se refiere a la máxima desviación entre la curva que representa a tal señal y una línea recta.

Banda muerta es el rango en el cual la entrada a un instrumento puede ser variada sín haber respuesta inicial. Se expresa generalmente en % de span.

Histéresis es la máxima diferencia en valores de salida para una entrada dada, cuando el instrumento recorre el rango completo de 0% a 100% a 0%. La histéresis es la suma del error histéretico y la banda muerta.

Se llama cero al límite inferior del span

El controlador es el mecanismo que selecciona a la señal de error y produce una señal de salida proporcional que es función del error. A las diferentes relaciones entre la señal de salida y el error se les llama modos ó acciones de control y hay tres de ellas que son:

- a) Proporcional.- La señal de salida del controlador es directamente proporcional al error.

$$p = \frac{1}{b} e + p_o$$

en donde, p_o = señal de salida cuando el error es 0

b = banda proporcional

p = señal de salida

e = error (diferencia entre punto de ajuste y variable de proceso).

- b) Control integral o reajuste automático.- La señal de salida es proporcional a la integral del error, o sea que siempre que hay un error la señal de salida del controlador está cambiando por la siguiente ecuación:

$$\frac{dp}{dt} = fe$$

- c) Control derivativo.- La señal de salida del controlador es proporcional a la velocidad de cambio del error o sea que toma en cuenta la velocidad del error. Sirve para procesos muy lentos.

$$P = r \frac{de}{dt} + p_o$$

$$\frac{dp}{dt} = r \frac{d^2e}{dt^2}$$

IV.3 Revisión Técnica de los Elementos

A. TRANSMISOR DE TEMPERATURA PM-501

Este transmisor va unido a un termocople del cual recibe una señal en milivolts y la convierte en una señal común que es proporcional a la temperatura medida.

El PM-501 introduce una señal compensante que cancela los errores potenciales debidos a los cambios de temperatura ambiente que incide sobre la unión entre el termocople y el transmisor y como resultado emite una señal de salida de 4 a 20 miliamperes, que representa el porcentaje de span de la temperatura medida.

a) Características principales

Señal de Entrada.- Span: 4-50 mV

Señal de Salida.- 4-20 mA

Exactitud.- $\pm 0.1\%$ del span a 75°F para efectos combinados de linealidad, histéresis y banda muerta.

Estabilidad.- A temperatura ambiente cambia $\pm 0.25\%$ del span para alteraciones de 140°F



en el ambiente.

Voltaje Común.- Límites: 60 Volts y 0-60 ci
clos para servicio continuo.

Límites de temperatura ambiente.- 20°F a
180°F.

Límites de Humedad Ambiente.- 10% a 95%

Peso.- 2.19 Kg.

b) Ventajas

- 1) Proporciona una rápida respuesta.
- 2) Se le da fácil mantenimiento porque el termocople es muy independiente del -- transmisor.
- 3) Puede ir montado en el campo y con ello se eliminan gastos de extensión de termocople e interferencia debida al ruído.
- 4) Su técnica de modulación y componentes de precisión determinan una gran exac-titud.
- 5) Cubierta a prueba de explosión y de humedad.

6) Su rango de temperatura puede cambiarse en el campo por medio del reemplazo de tres resistores.

7) Se puede lograr un amplio rango de spans.

B. CONTROLADOR INDICADOR TL-101

El TL-101 es un controlador indicador de proceso que sirve para manejar cualquier variable de temperatura, flujo, presión o nivel.

Recibe la señal de una variable de proceso procedente de algún transmisor, la compara a su punto de ajuste previamente establecido y emite una señal de salida a un elemento final de control; de tal manera que puede ser empleado en cualquier proceso. Contiene un switch para lograr trabajo con un punto de ajuste local o remoto, con el objeto de que pueda trabajar en grupos de control sencillos o en cascada.

a) Características principales

Entrada de variable de proceso.- 1 a 5 V,
4 a 20 mA ó 10 a 50 mA.

Entrada de punto de ajuste.- Ajustado manual

mente desde el control de punto de ajuste mon
tado enfrente o señal remota de 1 a 5V.

Señal de salida.- 1 a 5V y 4 a 20 mA ó 10 a
50 mA.

Estabilidad.- Las variaciones en temperaturas
afectan a la salidad $\pm 0.5\%$ para un cambio
de 50°F entre 40°F y 120°F. Las variaciones
en corriente afectan $\pm 0.1\%$ para cambios de
 $\pm 10\%$ en el voltaje de la línea.

Exactitud de Indicación.- Para la variable del
proceso y la desviación: $\pm 0.5\%$, para la sal
da: $\pm 2\%$ de la escala total.

Límites de temperatura ambiente.- 40°F a
120° F

Límites de Humedad Ambiente.- 10% a 95%.

Peso.- 1.84 Kg.

Arreglo Normal.- Dos modos de control (pro
porcional y reajuste) con escala lineal 0 - 100
ó de raíz cuadrada 0 - 10.

b) Ventajas

- 1) Su carátula frontal de 1" de ancho por

- 6" de alto permite montaje de alta densidad y por lo tanto ahorro de espacio.
- 2) En él se pueden observar la variable de proceso, el punto de ajuste y la señal de salida con la posición de la válvula controlada.
 - 3) Se puede transferir regulación manual a automática.
 - 4) Contiene amplificaciones de circuito integrado y componentes de estado sólido que permiten estabilidad y larga vida.
 - 5) Maneja una variedad de rangos de entrada y salida.

C. EXTRACTOR DE RAIZ CUADRADA TL-171

En la explicación del sistema Feedforward se vió la necesidad de usar un aparato que extrajera la raíz cuadrada a la señal de cada transmisor de flujo.

El TL-171 es un elemento de computación ciego (sin indicador) que se encarga de recibir la señal cuadrática procedente del transmisor de flujo, ex-

traerle raíz cuadrada y enviarla en forma lineal.

a) Características principales

Entrada de Variable de Proceso.- 1 a 5V, 4 a 20 mA ó 10 a 50 mA.

Señal de salida.- 1 a 5V y 4 a 20 mA ó 10 a 50 mA.

Estabilidad.- Las variaciones de temperatura afectan a la salida $\pm 0.5\%$ para un cambio de 50°F entre 40°F y 120°F . Las variaciones en corriente afectan $\pm 0.1\%$ para cambios de $\pm 10\%$ en el voltaje de la línea.

Exactitud.- Mejor que $\pm 1.0\%$ del span.

Límites de Temperatura Ambiente.- 40°F a 120°F .

Límites de Humedad Ambiente.- 10% a 95%

Peso.- 1.28 Kg.

Arreglo Normal.- Rangos de entrada y salida como se especifican.

b) Ventajas

- 1) Su parte frontal mide 1" de ancho por 6" de largo, lo cual permite montaje

de alta densidad y por lo tanto ahorro de espacio.

- 2) Sus amplificadores de circuito integrado y componentes de estado sólido dan como resultado estabilidad y larga vida.
- 3) Puede manejar loops que requieran 1-5V, 4-20mA ó 10-50 mA mediante un simple cambio de cordón de rango.
- 4) Se puede montar en un panel conjuntamente con otros instrumentos de su mismo loop.

D. MULTIPLICADOR-DIVISOR TL-172

Es un elemento de computación cuya principal función consiste en multiplicar o dividir dos entradas análogas o bien multiplicar 2 entradas y simultáneamente dividir las entre una tercera. No es indicador.

Su aplicación típica dentro del sistema Feedforward consiste en multiplicar las señales provenientes del transmisor y el analizador del flujo de alimentación con el objeto de llevar a cabo la ecuación de

control en la que se basa este sistema:

a) Características principales

Señal de entrada.- 1 a 5V, 4 a 20 mA ó 10-50 mA.

Señal de salida.- 1 a 5V, y 4 a 20 mA ó 10-50 mA.

Exactitud.- Puede ser calibrado a $\pm 0.2\%$ del span.

Límites de temperatura.- Mantiene la exactitud prescrita en temperaturas de 40°F a 120°F.

Límites de humedad ambiente.- 10% a 95%

Controles internos.- Factor de escala (a_0) continuamente ajustable de 0.1 a 8.0 bías de salida (B_0) continuamente ajustable de + 1 a + 3V.

Peso.- 1.34 Kg.

Arreglo Normal.- Ajuste de factor de escala interno y ajuste de bías de salida. Ajuste interno para selección de multiplicación únicamente, división solamente u operaciones de multiplicación y división simultáneas.

Ecuación de salida:

$$V_o = a_o \left[\frac{(V_{1-1}) (V_{2-1})}{(V_{3-1})} \right] + B_o$$

en donde, V_o = voltaje de salida (1-5 V)

a_o = factor de escala (0.1 - 8.0)

$V_1, V_2, V_3,$ = voltajes de entrada (1-5 V)

B_o = bías de salida (1-3 V)

b) Ventajas

- 1) El ajuste del factor de escala se puede hacer en el campo por medio de un simple switch.
- 2) El amplio span de factores de escala y bías de salida le da flexibilidad a la ecuación de salida y con ello se logra una mayor adaptabilidad a muchas aplicaciones de proceso.
- 3) De fácil instalación y remoción.
- 4) Se puede instalar conjuntamente con -- otros instrumentos de su loop en un -- mismo panel.

- 5) Tiene las mismas dimensiones que los otros instrumentos TL, lo cual permite montaje de alta densidad.
- 6) Contiene amplificadores de circuito integrado y componentes de estado sólido que proporcionan computaciones exactas, operación estable y larga vida.

E. MODULO LEAD-LAG TL-176

El módulo Lead-Lag es un elemento de computación dinámico no indicador que aplica atrasos o adelantos de tiempo con el objeto de compensar adelantos o atrasos de primer orden en las ecuaciones de control.

Puede ser usado con otros elementos de computación y controladores de proceso para lograr un control feedforward. Auxilia a obtener una mayor continuidad de señal en equipos que presentan retraso de tiempo entre una medición y otra como son los analizadores de composición.

a) Características principales

Entrada de variable de proceso.- 1 a 5V,

4 a 20 mA ó 10 a 50 mA.

Señal de salida.- 1 a 5V y 4 a 20 mA ó 10 a 50 mA.

Exactitud.- 0.5% del span a $a_o = 1$, $T_1 = T_2 = 120$ segundos, temperatura = 77°F y humedad relativa = 40%

Estabilidad.- Un cambio de $\pm 10\%$ en el voltaje de la línea crea cambios menores a 0.1% del span. Hay cambio de $\pm 0.5\%$ del span para una variación de temperatura de 50°F.

Límites de temperatura ambiente.- 40°F a 120°F.

Límites de Humedad ambiente.- 10% a 95%

Peso.- 1.5 Kg.

Ecuaciones de salida:

$$V_o = a_o \frac{(1 + T_2 S)}{(1 + T_1 S)} (PV - Bi) + B_o \quad \text{Control directo}$$

$$V_o = a_o \frac{(1 + T_2 S)}{(1 + T_1 S)} (Bi - PV) + B_o \quad \text{Control reverso}$$

en donde, V_o = señal de salida (1-5V)

a_o = ganancia (0.1 a 2.0 con .01

graduaciones)

T_1 = retraso (abre/cierra y - -
6-3000 segundos en 9 pasos)

T_2 = adelanto (abre/cierra y - -
6-3000 segundos en 9 pasos)

B_i = bías de entrada (1-5V)

B_o = bías de salida (1-5V)

PV = entrada de variable de proces
so (1-5V)

S = operador laplace

b) Ventajas

- 1) El amplio span de adelanto y retraso de tiempo, ganancia y bías de salida y entrada originan una adaptación exacta a muchas ecuaciones de proceso.
- 2) Fácil remoción o instalación
- 3) Su poco espacio permite un montaje de alta densidad.

F. ESTACION DE RELACION REMOTA TL-142

La estación de relación remota multiplica la señal

que recibe de una variable de proceso por una relación previamente fijada. En el caso de una columna de destilación, la entrada de vapor al recalentador está en función de la cantidad alimentada a la columna, por lo que es importante establecer una relación a través de la estación TL-142.

a) Características principales

Entrada de variable de proceso.- 1 a 5V, 4 a 10 mA, 10 a 50 mA.

Entrada de variable de relación.- 1 a 5V.

Señal de salida.- 1 a 5V y 4 a 20 mA ó 10 a 50 mA.

Indicación.- Indica la relación en una escala lineal de 2 1/4", de 0.3 a 3.0 ó de raíz cuadrada o de 0.55 a 1.732

Exactitud de indicación.- ± 0.5 de la escala total.

Exactitud de relación.- ± 0.5 del valor de relación proyectado.

Estabilidad.- Un cambio de 50°F en la temperatura ambiente origina variación de $\pm 0.5\%$

del span en la señal de salida. Un cambio de 10% en el voltaje de la línea produce variación de $\pm 0.1\%$ del span en la señal de salida.

Ecuaciones de salida:

$$V_o = R (PV - Bi) + B_o \quad \text{Control directo}$$

$$V_o = R (Bi - PV) + B_o \quad \text{Control reverso}$$

en donde, V_o = señal de salida (1-5V)

R = relación que depende de la variable de relación y del switch de acción de relación.

acción de relación directa: $R=0.675 RV-0.375$

acción de relación reversa: $R= 0.675 RV + 3.675$

RV = variable de relación (1-5V)

PV = variable de proceso (1-5V)

Bi = bías de entrada (1-5V) ó continuamente ajustable por potenciómetro interno.

B_o = bías de salida (1-5V) ó continuamente ajustable.

b) Ventajas

1) Gran exactitud de relación

- 2) Es un instrumento sencillo que efectúa operaciones para las que anteriormente se requerían varias unidades
- 3) Facilidad de operación y de montaje.

G. TRANSDUCTOR ELECTRONEUMATICO 546

El transductor electroneumático es un elemento que va instalado en las válvulas de control y que se en carga de convertir la señal eléctrica que recibe de los instrumentos en señal neumática con el objeto de enviarla a la válvula, la cual opera con aire. Esta conversión se lleva a cabo por medio de un motor de torque, un sistema tobera-palometa y un relevador neumático.

a) Características principales

Señal de entrada.- 1 a 5 mA, 4 a 20 mA, 10 a 50 mA, 1 a 9 V, ó alguno de esos rangos divididos a la mitad.

Señal de salida.- 3 a 15 psig, 6 a 30 psig ó 3 a 27 psig.

Aire de abastecimiento.- 5 psig mayor que el rango superior de la señal de salida.

Exactitud.- $\pm 0.75\%$ del span de la señal de salida.

Linearidad.- $\pm 0.50\%$ del span de la señal de salida.

Banda Muerta.- 0.10% del span de la señal de salida.

Histéresis.- 0.50% del span de la señal de salida.

Límites de temperatura ambiente.- -40°F a 150°F

Ajustes interiores de cero y de span,

Peso.- 4 Kg.

b) Ventajas

- 1) Es muy resistente a la vibración
- 2) El span y el cero son fáciles de ajustar
- 3) No se requieren partes adicionales para cambiar la acción directa en reversa.

H. TRANSMISOR DE PRESION DIFERENCIAL 1 151-DP

El flujo se relaciona con la ΔP a través de la fórmula $Q = \sqrt{\Delta P}$ y a ello se debe que se emplee un transmisor de presión diferencial para detectar los

cambios de flujo.

Esa medición se lleva a cabo por medio de dos tomas de flujo que llevan a éste a ejercer presión sobre unos diafragmas aislantes que contienen a un aceite silicón que a su vez comunica esa presión a un diafragma sensor central que recibe en sus dos caras las diferentes presiones y por lo tanto experimenta un desplazamiento no mayor de .004 pulgadas que es proporcional a la presión diferencial.

La posición del diafragma sensor es detectada por unos platos capacitores colocados en ambos lados y la capacitancia diferencial entre el diafragma y los platos es convertida electrónicamente a señal 4 a 20 mA ó 10 a 50 mA.

a) Características principales

Servicio-líquido, gas o vapor

Rangos.- 0 a 5/30" H₂O

0 a 25/140" H₂O

0 a 125/750" H₂O

Señal de salida.- 4 a 20 mA ó 10 a 50 mA

Indicación.- Escala de 1 3/4" con una exactiu

tud de $\pm 2\%$

A prueba de explosión e intrínsecamente seguro.

Span y cero ajustables externamente.

Límites de temperatura ambiente.- -20°F a 200°F

Límites de humedad ambiente.- 0 a 100%

Exactitud.- $\pm 0.2\%$ del span calibrado. Incluye efectos combinados de linealidad, histéresis y repetibilidad.

Histéresis.- 0.05% del span calibrado

Linealidad.- $\pm 0.1\%$ del span calibrado

Repetibilidad.- 0.05% del span calibrado

Banda Muerta.- Ninguna

Estabilidad.- Variación de $\pm 1\%$ del span por cambio de 100°F y varía menos de 0.005% por cada volt.

Peso.- 5.4 Kg.

b) Ventajas

- 1) Medición exacta de flujo, nivel, vacío y gravedad específica

- 2) Facilidad de instalación y calibración externa.
- 3) Construcción a prueba de explosión y a prueba de climas.

I. TRANSMISOR DE NIVEL DE LIQUIDO 1 151-LL

Este transmisor de nivel funciona con el mismo principio del transmisor de flujo que se vió anteriormente en base al diafragma sensor y los platos capacitores, pero aquí la única diferencia es que por un lado se toma la presión de la cabeza o presión hidrostática del nivel y por el otro lado se toma la presión atmosférica o alguna presión de referencia y así se mide el nivel en base a la presión diferencial obtenida.

a) Características principales.

Servicio.- Líquido en tanques abiertos o cerrados.

Rangos.- 0 a 25/ 150" H₂O

0 a 125/750" H₂O

Señal de salida.- 4 a 20 mA ó 10 a 50 mA.

Indicación.- Escala de 1 3/4" con exactitud

de $\pm 2\%$

A prueba de explosión e intrínsecamente seguro.

Span y cero ajustables externamente

Límites de temperatura ambiente.- 20°F a 200°F

Límites de humedad ambiente.- 0 a 100%

Exactitud.- $\pm 0.25\%$ del span calibrado. Incluye efectos combinados de linealidad, histéresis y repetibilidad.

Estabilidad.- Variación de $\pm 1.5\%$ del span por cambio de 100°F y varía menos de 0.005% por cada volt.

Peso.- 13.1 Kg.

b) Ventajas

- 1) Medición exacta de nivel y gravedad específica para una amplia gama de formas de recipientes.
- 2) Facilidad de instalación por medio de una brida a los tanques
- 3) Calibración externa del span.

- 3) Calibración externa del span
- 4) Construcción a prueba de explosión y a prueba de clima
- 5) Las tablillas con circuito impreso de estado sólido son intercambiables entre todos los transmisores 1 151.

J. TRANSMISOR DE PRESION MANOMETRICA 1 151-GP

Este transmisor de presión trabaja con el mismo principio de los anteriores transmisores en base al diafragma sensor y los platos capacitores, pero con la diferencia de que aquí se detecta por un lado la presión del sistema y por el otro lado la presión atmosférica como punto de referencia.

a) Características principales

Servicio.- Líquido, gas o vapor

Rangos.- 0 a 5/ 30" H₂O

0 a 25/ 150" H₂O

0 a 125/ 750" H₂O

0 a 17/ 100 Psig

0 a 50/ 300 Psig

0 a 170/1 000 Psig

0 a 500/3 000 Psig

0 a 1 000/6 000 Psig

Señal de salida.- 4 a 20 mA ó 10 a 50 mA.

Indicación.- Escala de 1 3/4" con exactitud de $\pm 2\%$.

A prueba de explosión e intrínsecamente seguro.

Span y cero ajustables externamente.

Límites de temperatura ambiente.- -20°F a 200°F

Límites de Humedad ambiente.- 0 a 100%

Exactitud.- $\pm 0.25\%$ del span calibrado. Incluye efectos combinados de linealidad, histéresis y repetibilidad.

Estabilidad.- Variación de $\pm 1\%$ del span por cambio de 100°F y varía menos de 0.005% por cada volt.

Peso.- 5.4 Kg.

b) Ventajas

- 1) Medición exacta de presión e inclusive de vacío también por medio de la rever

sión de bridas y conexión al lado de la baja presión del elemento sensible.

- 2) Instalación sencilla
- 3) Ajuste externo del span y cero
- 4) También tiene circuito impreso que puede ser intercambiable con los demás transmisores 1 151.

K. ANALIZADOR DE COMPOSICION

El modelo y característica del analizador de composición dependen directamente del tipo de muestra que analizará.

Los más populares y efectivos son aquellos basados en cromatografía de gases. Desgraciadamente los cromatógrafos proporcionan una señal no continua debida a los análisis que efectúan a intervalos. La velocidad de análisis y confiabilidad del instrumento se han mejorado enormemente en los últimos diez años.

El analizador se conecta en línea para que efectúe muestreos y, en base a ellos, mande una señal proporcional a un elemento de computación multiplica

dor. Debido a un alto costo y la importancia de técnicas de muestreo bien diseñadas, es preferible la asesoría de un técnico especializado en la instalación y arranque de este aparato.

a) Características principales

Señal de salida.- 4 a 20 mA ó 10 a 50 mA.

Límites de temperatura ambiente.- 40°F a 120°F

Límites de humedad ambiente.- 10% a 95%

Tiempo mínimo de muestreo.- 5 segundos

Tiempo máximo de muestreo.- 10 ó 15 minutos.

b) Ventajas

Dependiendo de la naturaleza de la operación, el analizador efectúa sus muestreos en intervalos que pueden ir de 5 segundos a 15 minutos. Una señal muy discontinua puede afectar completamente al sistema porque está creando un retraso en la medición.

Afortunadamente se cuenta con elementos de computación adelanto/atraso que compensan

dor. Debido a un alto costo y la importancia de técnicas de muestreo bien diseñadas, es preferible la asesoría de un técnico especializado en la instalación y arranque de este aparato.

a) Características principales

Señal de salida.- 4 a 20 mA ó 10 a 50 mA.

Límites de temperatura ambiente.- 40°F a 120°F

Límites de humedad ambiente.- 10% a 95%

Tiempo mínimo de muestreo.- 5 segundos

Tiempo máximo de muestreo.- 10 ó 15 minutos.

b) Ventajas

Dependiendo de la naturaleza de la operación, el analizador efectúa sus muestreos en intervalos que pueden ir de 5 segundos a 15 minutos. Una señal muy discontinua puede afectar completamente al sistema porque está creando un retraso en la medición.

Afortunadamente se cuenta con elementos de computación adelanto/atraso que compensan

el atraso de la señal y proporcionan una mayor continuidad de ésta.

CAPITULO V

ANALISIS DE COSTOS

V. ANALISIS DE COSTOS

Falta mucho tiempo para que la instrumentación neumática sea completamente desplazada, pero más de la mitad de la instrumentación de proceso que se compra ahora es electrónica. Es más, gran cantidad del equipo neumático nuevo adquirido actualmente es para modificaciones o expansiones en donde el equipo instalado influencia la elección, así que las nuevas instalaciones tienen mayor tendencia a ser electrónicas que neumáticas.

Existen varias razones para ese cambio en preferencia: conveniencia, moda, facilidad de instalación, exactitud, costo y mayor compatibilidad de computadora y controlador. Si se tiene que hacer una decisión inteligente, se deben evaluar todos los factores existentes y balancearlos. El costo por sí mismo no es el criterio definitivo.

Cuando se van a evaluar las alternativas neumática y electrónica se debe considerar cada aplicación por separado, tomando en cuenta el desempeño deseado o especificado para cada clase de instrumento y para cada unidad. Una vez obtenidos los factores de selección, se sopesan contra el costo total

que incluye equipo e instalación y se obtiene la mejor solución.

V.1 Evaluación Técnica

Pocos sistemas de control son completamente neumáticos o electrónicos puesto que en la mayoría se mezclan ambos elementos. Las válvulas de control tienen actuadores neumáticos usualmente porque estos desarrollan fuerzas mayores, mientras que los aparatos electrónicos tienen la precisión y exactitud requerida para medir flujos críticos. Por lo tanto, el medio usado para el procesamiento y la transmisión de una señal es lo que clasifica a un sistema como electrónico o neumático.

A continuación se hace una comparación entre ambos sistemas en lo que se refiere a los trece aspectos técnicos más importantes:

A. DISTANCIA DE TRANSMISION

Neumático.- Limitada a varios cientos de pies

Electrónico.- Virtualmente ilimitada

B. ESTANDARIZACION DE SEÑAL

Neumático.- 3 a 15 psi aceptada universalmente

Electrónico.- 4 a 20 mA la más común aunque hay

otros rangos disponibles.

C. OPERACION DE LA VALVULA DE CONTROL

Neumático.- La salida del controlador puede operar la válvula directamente.

Electrónico.- La mayoría de las válvulas son neumáticas y por lo tanto se requiere de convertidores electro-neumáticos.

D. COMPATIBILIDAD CON COMPUTADORAS DIGITALES.

Neumático.- Se requieren convertidores neumático-electrónicos y análogo-digitales.

Electrónico.- Se requieren convertidores análogo-digitales.

E. CONFIABILIDAD

Neumático.- Excelente si el aire de instrumentos es seco y limpio.

Electrónico.- Buena bajo condiciones ambientales normales.

F. REACCION A TEMPERATURAS DE CONGELACION

Neumático.- Buena si el aire es suficientemente seco.

Electrónico.- Excelente.

G. REACCION A INTERFERENCIA ELECTRICA

Neumático.- Ninguna.

Electrónico.- Buena si el equipo está instalado y protegido adecuadamente.

H. OPERACION EN AREAS EXPLOSIVAS O INFLAMABLES.

Neumático.- Equipo seguro, con excepción de una posible carga estática inducida del aire a través de los orificios.

Electrónico.- Hay equipo a prueba de explosión e intrínsecamente seguro. Los instrumentos deben ser removidos para ser probados o darles mantenimiento.

I. REACCION A FALLO REPENTINO DE ENERGIA - ELECTRICA

Neumático.- Existe algún margen de seguridad debido a la capacitancia del sistema. Hay generadores auxiliares para los compresores pero son caros.

Electrónico.- Una falla de electricidad para a la planta. Hay fuentes de poder ininterrumpibles pero son caras.

J. RESPUESTA DINAMICA

Neumático.- Lenta pero adecuada a la mayoría de loops de control, a menos que las distancias entre las unidades de proceso y el cuarto de control sean largas.

Electrónico.- Excelente. Las válvulas son a menudo los factores limitantes.

K. OPERACION EN ATMOSFERAS CORROSIVAS

Neumático.- Buena, porque el aire actúa como purga para la mayoría de los instrumentos.

Electrónico.- Susceptible a daño a menos que se tomen precauciones especiales.

L. MANTENIMIENTO Y REPARACION

Neumático.- Los elementos son simples, pero su mantenimiento y reparación son difíciles de automatizar y requieren de una labor interna.

Electrónico.- Los circuitos han sido complejos tradicionalmente y requerían técnicos expertos, pero ahora hay probadores automáticos que simplifican el mantenimiento y las reparaciones. Los módulos de circuito integrado hacen más fáciles y elementales las reparaciones en el mismo campo.

M. MODOS DE CONTROL

Neumático. - Hay controladores abre-cierra y de uno, dos y tres modos. En algunas unidades integrales no es posible ajustar el tiempo de reajuste a cero.

Electrónico. - Hay controladores abre-cierra y de uno, dos y tres modos. También hay elementos con modos de control más avanzados como auto-optimización.

De lo anterior se resume que el punto fuerte de los instrumentos neumáticos es su uso en atmósferas corrosivas o en lugares con fallas de corriente eléctrica frecuentes.

V.2 Evaluación Económica

La economía es la principal razón para la selección de equipo neumático en vez de electrónico, pero es una economía mal entendida.

El cálculo económico depende de cada aplicación en particular, de tal modo que no hay reglas simples para comparar los costos de sistemas de instrumentación alternos.

En forma general, se puede decir que hay cinco factores muy importantes que siempre deben ser tomados en cuenta:

- a) Costo de los instrumentos de campo

- b) Costo de los instrumentos de tablero de control
- c) Costo del equipo de aire
- d) Costo del tablero de control
- e) Costo del edificio de control

En el presente trabajo se dará más importancia a los costos de instrumentos de campo e instrumentos de tablero de control, debido a que son las que más interesan para el estudio de instrumentación de columnas de destilación en forma particular. Los últimos tres costos que se mencionan se aplican en forma más amplia en el cálculo de costos generales de instrumentación de una planta o sistema completo.

Para darle más representatividad a la estimación de costos precedentes, se tomó como base de cálculo una batería de cuatro columnas de destilación con sistemas de instrumentación tipo "Feedforward" con separación constante como el que se muestra en la figura 3.10 del capítulo III.

TABLAS DE COSTOS ESTIMADOS

I. INSTRUMENTOS DE CAMPO

	<u>Núm. Requerido</u>		<u>Precio Unit.</u>		<u>Costo total</u>	
	Elec.	Neum.	Elec.	Neum.	Elec.	Neum.
Transmisor de flujo	12	12	600	340	7 200	4 080
Transmisor de nivel	8	8	667	385	5 336	3 080
Transmisor de presión	4	4	523	305	2 092	1 220
Transmisor de tempe- ratura.	4	4	511	370	2 044	1 480
Posicionador de vál- vula	20	20	213	162	4 260	3 240
Convertidor electro- neumático	20	-	187	-	3 740	-
Total de instrumen- tos de campo.					24 672	13 100

II. INSTRUMENTOS DE TABLERO

	<u>Núm. Requerido</u>		<u>Precio Unit.</u>		<u>Costo total</u>	
	Elec.	Neum.	Elec.	Neum.	Elec.	Neum.
Controladores de 2 modos	24	24	531	490	12 744	11 760

Controladores de 3						
modos	4	4	564	550	2 256	2 200
Estaciones de rela-						
ción	4	4	289	410	1 156	1 640
Registradores dedi-						
cados	20	20	212	322	4 240	6 440
Convertidores mv-						
neum.	-	4	-	655	-	2 620
Extractores de raíz						
cuadrada	12	12	205	225	2 460	2 700
Sumadores y multi-						
plicadores.	8	8	220	320	1760	2 560
Fuentes de poder	2	-	289	-	578	-
Fuentes de poder de						
respaldo	1	-	319	-	319	-
Batería de respaldo	1	-	540	-	540	-
TOTAL DE INSTRUMENTOS DE TABLERO:					26 053	29 920

En las tablas anteriores que muestran únicamente el costo aislado de los instrumentos para las cuatro columnas de destila-

lación, se apreció que los instrumentos neumáticos de campo son más baratos por 11 572 dólares y los instrumentos neumáticos de tablero son más caros por 3 867 dólares.

En la parte final de la segunda tabla se indican las fuentes de poder principal y de reserva, las cuales son necesarias para cada unidad de proceso, y en cambio no son requeridas en un sistema neumático.

El objetivo principal de este capítulo es el análisis económico de la instrumentación de una columna de destilación y no el análisis completo de la instrumentación de una plata, y es por ello que aquí únicamente se plantean los costos de los instrumentos que intervienen en la columna.

La infinita variedad de procesos existentes en la industria química y la influencia directa que tiene el lugar geográfico de una planta en el costo de su instrumentación son grandes obstáculos para la obtención del costo representativo promedio de la instrumentación de esa planta, por la cual no se tienen datos precisos pero sí algunas referencias.

Se hizo un estudio respecto a costos de equipo de aire, tablero de control y edificio de control y los resultados fueron los siguientes:

Equipo de aire.- El equipo neumático resultó 31.4% más caro que el electrónico. Se consideraron costos de compresores, receptores y secadores refrigerados. Ambos sistemas, neumático y electrónico, usan equipo de aire para operar las válvulas de control; las capacidades requeridas son mayores con instrumentación neumática.

Tablero de control.- El tablero para instrumentos neumáticos resultó 30.1% más caro que el tablero para instrumentos electrónicos. Se consideran costos de diseño y materiales del tablero, alambrado del electrónico y tubería de cobre del neumático.

Edificio de control.- El edificio de control neumático resultó 12.6% más caro que el electrónico. En este caso se consideraron los costos de edificios de control similares ya en operación.

Como se puede ver, después de considerar todos los factores anteriores, la instrumentación electrónica resulta con un costo más o menos similar a la neumática, ninguna tiene una amplia ventaja en costos. Cuando se tenga algún proyecto específico de instrumentación en las manos, la decisión final será resultado de una serie de evaluaciones técnicas y económicas adecuadas al proyecto en estudio.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

vi. CONCLUSIONES

1. El mejor control de las columnas de destilación - tiene cuatro finalidades:
 - a) Disminuir el consumo de los servicios.- Los costos actuales de los energéticos crean la necesidad de reducir el consumo de vapor o aceite caliente en los recalentadores y reducir el refrigerante en los condensadores.
 - b) Lograr estabilidad en la columna.- La inestabilidad básicamente es debida a diseño inadecuado o incompleto de los circuitos de control. Una columna oscila debido a los disturbios más comunes: cambios en el flujo de alimentación, cambios en la composición de alimentación, cambios de los vapores provenientes de otras unidades.
 - c) Obtener el máximo de utilidad.- La utilidad es realmente la suma de los puntos anteriores y justifica por sí misma el uso de un mejor control.
2. La temperatura en el interior de una columna de

destilación es el indicador más veráz del grado de separación que se tiene en ella y a esto se debe que la mayoría de sistemas de instrumentación la use como base.

3. Hay dos niveles de control que se deben aplicar:

a) Control de estabilización

b) Control de optimización

No importa qué tan buena sea la estrategia de optimización si no se ha logrado la estabilización de la columna, puesto que sin ella no se obtendrá beneficio alguno.

La estabilización consiste en proporcionar un sistema de control capaz de manejar los disturbios que normalmente ocurren en el sistema. Un ejemplo frecuente de un control pobre de estabilización es la sobrefracionación, la cual consiste en que la columna de destilación está haciendo el producto más puro de lo necesario.

4. Dos grandes filosofías de control han sido ampliamente usadas para el control de las columnas de destilación.

- a) Control del balance de energía o control indirecto del balance de materia.
- b) Control directo del balance de materia.

La observación del comportamiento de las columnas de destilación han llevado a conclusiones importantes que han determinado el uso del control directo de materia como la filosofía de control más apropiada para lograr una mejor estabilidad de operación, manteniendo, además, la separación deseada.

Tales conclusiones son las siguientes:

- a) La composición de las corrientes de productos es afectada por la relación de flujo destilado con respecto a alimentación (D/F)
- b) Se puede ajustar por cambios en la composición de la alimentación cambiando la relación D/F
- c) Con separación constante, el control de la composición de cualquier producto resulta en control de composición del otro producto.
- d) Las columnas de destilación son más sensitivas a los cambios en la relación destilado/alimentación (D/F) que en la relación flujo

de vapor/alimentación (V/F).

- e) En el esquema de control de balance de energía, ninguna de las corrientes de salida es ajustada directamente por una medición del disturbio, que es la temperatura, y con tal esquema las interacciones entre el balance de material y de energía causan más oscilaciones y se tendrá un tiempo de ajuste más largo que con el control directo del balance de materia.
5. El control de retroalimentación es probablemente la más básica e importante forma de control avanzado. Se define como: el uso inteligente de la información de proceso para efectuar acción correctiva antes de que un disturbio lo desajuste. Se basa en un algoritmo de control, el cual se puede aplicar para lograr una separación constante o una máxima separación según el caso que se desee y las características del sistema.
6. La instrumentación electrónica aventaja técnicamente a la neumática en que la distancia de transmi-

sión de aquella es ilimitada y además su respuesta dinámica es superior.

En el aspecto económico, la instrumentación electrónica es más cara, tomando en cuenta los precios aislados de los instrumentos, pero es muy pequeña la diferencia, si se consideran los costos totales de instalación y servicios.

7. En este trabajo se eligió un caso específico de destilación (de dos componentes), apropiado para el fin pretendido, pero es indudable que existen otros casos que requerirán de una instrumentación más o menos detallada, más sencilla o más compleja. En el campo de la instrumentación es necesario tener consciencia de que en ésta pueden aplicarse mil criterios. Cada caso requiere de un estudio específico del problema.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

1. Kern D.Q.
Process Heat Transfer
McGraw-Hill Book Company, Inc.
New York, N.Y. 1950

2. McCabe W.L., Smith J.C.
Unit Operations of Chemical Engineering
McGraw-Hill Book Company, Inc.
New York, N.Y. 1956

3. Warren C. W.
How to Read Instrument Flow Sheets
Hydrocarbon Processing 1975

4. Deuschle R.
Pneumatic. Electronic. Which to Buy?
Instruments and Control Systems. 1975

5. Seman R.C., Misenfeld A.E.
Digital Distillation column control

Offers Flexibility

Oil and Gas Journal. October 20, 1975

6. Fisher Controls

<u>Boletines Técnicos</u>	<u>Fecha</u>
11.6 PM 501	Nov. 72
1.1 TL 101	Dic. 72
1.6 TL 171	Dic. 72
1.6 TL 172	Jul. 72
1.6 TL 173	Ene. 73
1.6 TL 176	May. 74
13.1 546	Agos. 74