

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMATICO
PARA HORNOS DE CALCINACION DE YESO**

89

T E S I S
Que para obtener el título de:
INGENIERO QUIMICO
p r e s e n t a
LUCAS ENCINAS GARCIA

México, D. F.

1974



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



11-84



PRESIDENTE: ROBERTO ENRIQUEZ MENDOZA
VOCAL: OCTAVIO FIGUEROA ARECHAVALTA
SECRETARIO: DR. ENRICO MARTINEZ SAENZ
1er. SUPLENTE: CARLOS DOORMAN MONTERO
2o. SUPLENTE: CUTBERTO RAMIREZ CASTILLO

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

YESO EL TIGRE, S.A.

SUSTENTANTE: LUCAS ENCINAS GARCIA
ASESOR DEL TEMA: DR. ENRICO MARTINEZ SAENZ

Solicitud

#5

n. de adquisición

M-t-84

n. de v.

Signatura Topográfica

Autor

ENCINAS GARCIA, L.

Título DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA HORNOS ...

Past. ent.

med. past.

reenc.

revista

color

Observaciones

A MI PADRE EL

SR. JOSE ENCINAS PEÑUÑURI

A QUIEN SIEMPRE RECORDARE.

A MI MADRE LA

SRA. GLORIA GARCIA VDA. DE ENCINAS

CON TODO EL CARIÑO DE SU HIJO.

A MIS HERMANOS:

EVA

NAZARIA

JOSE

GLORIA

ANTONIO

A TODOS MIS FAMILIARES

A MIS AMIGOS

AL DR. ENRICO MARTINEZ SAENZ

POR SU VALIOSA DIRECCION EN ESTA TESIS

QUIERO AGRADECER A LA COMPAÑIA, YESO EL TIGRE, POR
TODAS LAS FACILIDADES QUE ME PROPORCIONO PARA LA
ELAVORACION DE ESTA TESIS, EN ESPECIAL A SU GERENTE
GENERAL:

ING. JUAN ECHEVERIA S.V.

I N D I C E

- I.- Introducción
- II.- Generalidades
- III.- Estudio del consumo de combustible
 - 1.- Tipo de control actual
 - 2.- Cuantificación
 - 3.- Costo del sistema actual
- IV.- Diseño del sistema de control automático
- V.- Costo del nuevo sistema
- VI.- Comparación de costo por el sistema flujo de efectivo descontado.
- VII.- Conclusiones
- VIII.- Bibliografía
- IX.- Apéndice

N O M E N C L A T U R A

- A = Area de pérdida de calor, m^2 .
- a = Area del elemento de medida, Cm^2 .
- b = Banda proporcional en porciento.
- C = Capacitancia térmica, $BTU/^\circ C = w P_2$.
- c = Punto de control ó ajuste.
- C_p = Calor específico del yeso.
- D = Depreciación.
- d = Valor presente.
- e = Es el error.
- F = Costo inicial.
- f = Flujo de calor al elemento, cal/seg .
- $F(S)$ = La función de S, transformada de f (t).
- H_1 = Volúmen parcial en peso.
- H_2 = Coeficiente de transferencia de calor, cal/seg .
 $Cm^2 (^\circ C/Cm)$.
- H_a = Humedad ambiente en %.
- H/D = Coeficiente cilíndrico (13).
- H_p = Humedad con que sale el producto en %.
- H_s = Humedad contenida en la alimentación en %
- i = Interés.
- K = Factor real independiente de S, ó parte escalar de la función de transferencia.

- K_1 = Radio vertical del tanque elíptico.
 K_2 = Radio horizontal del tanque elíptico.
 K_C = Banda proporcional en %.
 K_V = Constante de integración, posición inicial de la válvula.
 J = Valor de salvamento al final de la vida útil de un equipo.
 L = Longitud del horno, m.
 l = Espesor de pared, Cm.
 M = Cantidad alimentada, Kg.
 M_a = Masa del agua que se evapora, Kg. de agua.
 M_m = Masa del mineral, Kg.
 m = Masa del yeso.
 n = Número de años.
 P = Calor específico del elemento, Cal/gr°C.
 p = Señal de la variable ó posición de la válvula en %.
 P_c = Poder calorífico, Kcal/Kg.
 P_o = Una constante que depende del reajuste manual.
 P_i = Período.
 p_1 = Calor específico del yeso A ó B, BTU/Kg.°C.
 p_2 = Calor específico del aire, BTU/Kg. °C.
 Q = Flujo de aire que pasa a través del horno, Kg/seg.
 Q_c = Calor de combustión, Kcal/día.

- q = Acción derivativa, minutos.
 q_1 = Calor perdido a través de la pared.
 q_s = Calor perdido por la chimenea, BTU/seg.
 r = Velocidad de reajuste, min.
 S = Operador diferencial.
 s_1 = Suma futura de dinero.
 T = Temperatura de salida del horno, °C.
 TS = Operador de transferencia.
 t = Tiempo.
 U = Temperatura ambiente, °C.
 U_1 = Coeficiente de pérdida de calor, BTU/m²°C.
 U_2 = Temperatura del aire al entrar al horno, °C.
 V = Velocidad de entrada del yeso, m/seg.
 v = Señal de la variable controlada.
 W = Peso del elemento, Kg.
 w = Peso del aire contenido en el horno, Kg.
 α = Factor de amortiguamiento, parte en fase de S.
 O_o = Variable de salida.
 O_i = Variable de entrada.
 λ = Calor de evaporación del agua = 520 Kcal/Kg. a 120°C.

I.- INTRODUCCION

I.- INTRODUCCION

El presente trabajo ha sido desarrollado en la Fábrica de Yeso "El Tigre", en la cual existen dos hornos rotatorios para la calcinación del yeso-piedra, los cuales es necesario equipar con controles automáticos adecuados. El objetivo del presente trabajo consiste en efectuar el estudio de los sistemas mencionados para seleccionar los controles necesarios, para la producción del yeso A y del B por ser los de mayor volúmen.

La variable por controlar es la temperatura dentro del horno de calcinación, la cual actualmente se controla manualmente por medio de una válvula que abre o cierra la entrada del combustible.

Los factores que ocasionan variaciones en la temperatura están asociados a las características de la roca y son principalmente el tamaño de la partícula y el volúmen alimentado. Si el tamaño promedio de la roca es demasiado grande, la temperatura del horno desciende debido a la gran resistencia a la transferencia de calor entre la superficie y el centro de la partícula, mientras que si ésta es muy pequeña, la temperatura de calcinación aumenta. El volúmen de alimentación se controla por medio de un regulador en forma de disco colocado en el fondo de la tolva que alimenta material a la entrada del horno.

Las ventajas que puede reportar la utilización de un equipo de control automático son entre otras, ahorro en el gasto de combustible, mejor calidad de producto; pues con una temperatura de calcinación constante se logra una humedad uniforme, la --- cual repercute en el tiempo de fraguado del yeso. Por último - se reduciría el empleo de mano de obra para este proceso en -- particular.

II.- GENERALIDADES

II.- GENERALIDADES

El control automático se le puede definir, como una técnica - para balancear la alimentación (de material y energía), contra la demanda sobre un período, para mantener un proceso a algún nivel predeterminado de operación.

Por medio del conocimiento de la teoría de control es como se proporcionan las bases para entender el comportamiento de los sistemas de control, los cuales emplean frecuentemente componentes de diferentes tipos, ya sean mecánicos, eléctricos, -- hidráulicos, neumáticos, electrónicos ó combinaciones de éstos.

Controlador.- Es el que detecta una señal de error y produce una señal de salida proporcional a alguna función de error. - Esta señal es una fuerza que actúa presionando al elemento final de control.

El controlador interpreta los cambios de la variable y produce una acción correctiva para mantener el balance deseado en el proceso. La forma con la cual el controlador produce esta acción correctiva es llamada forma de control.

Las principales formas de control son:

- 1.- Control de dos posiciones
- 2.- Control flotante de una sola velocidad

- 3.- Control flotante de velocidad proporcional
- 4.- Control proporcional
- 5.- Control proporcional más reajuste
- 6.- Control proporcional más reajuste, más derivativa.

Control de dos posiciones.

Esta forma de control también conocida como "ON-OFF", es aquella en la cual el elemento final de control se mueve a una de sus dos posiciones extremas cuando la variable controlada alcanza un valor predeterminado, o sea dependiendo de que si la variable controlada esta arriba o abajo del punto de control. En este caso el controlador no reconoce magnitud o velocidad de desviación y sólo reacciona a valores fijos de la variable controlada, como se observa en la Figura II-1.

Control flotante de una sola velocidad.

En esta forma de control el elemento final de control se mueve gradualmente de su posición abierta o cerrada dependiendo de si la variable controlada está arriba o abajo del punto de control. En otras palabras, la válvula es gradualmente abierta o cerrada y flota en una posición parcialmente abierta, como se observa en la Figura II-2.

Esta forma de control, no reconoce la velocidad o magnitud de

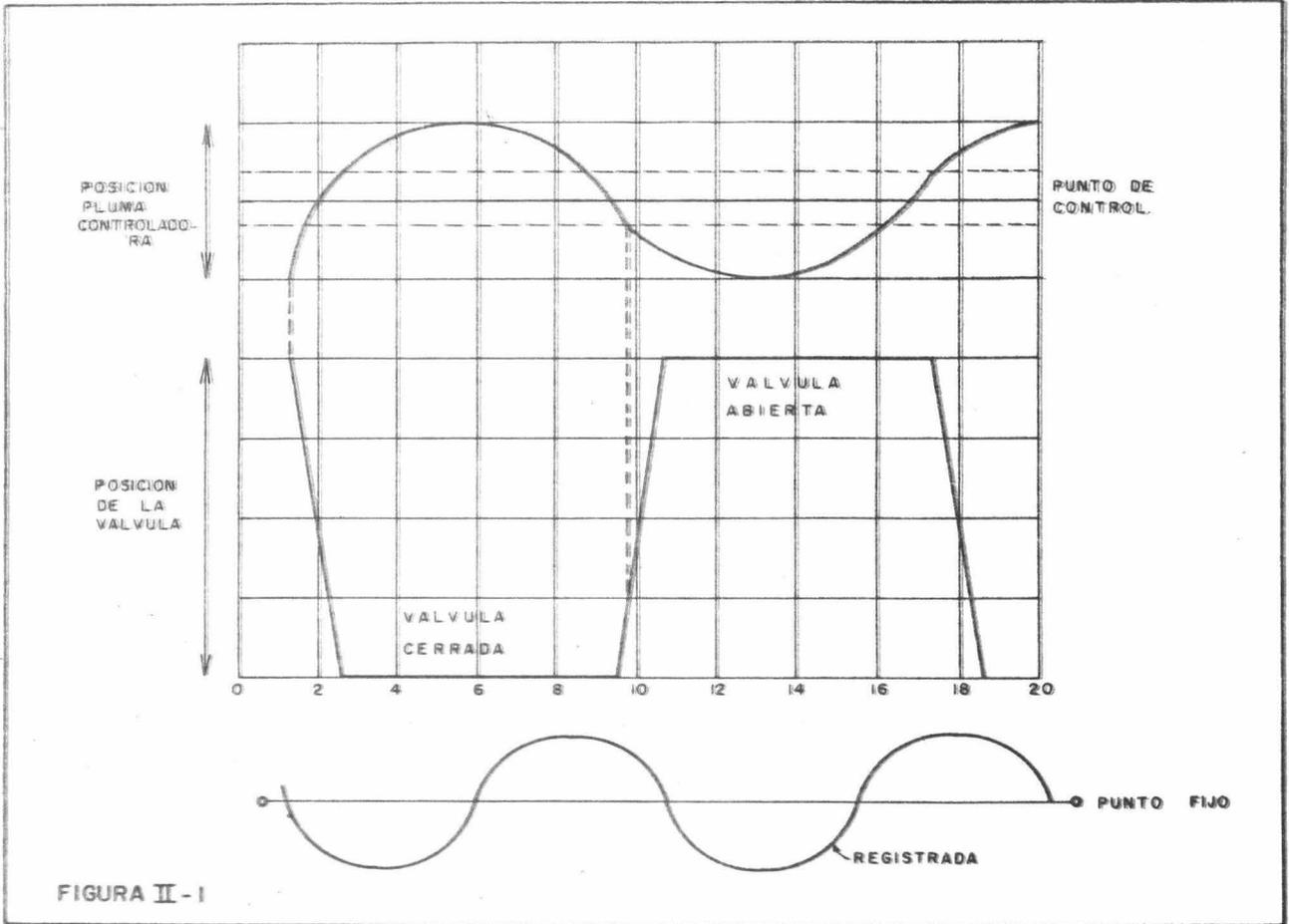


FIGURA II - I

CARACTERISTICAS DEL CONTROL FLOTANTE
DE UNA VELOCIDAD

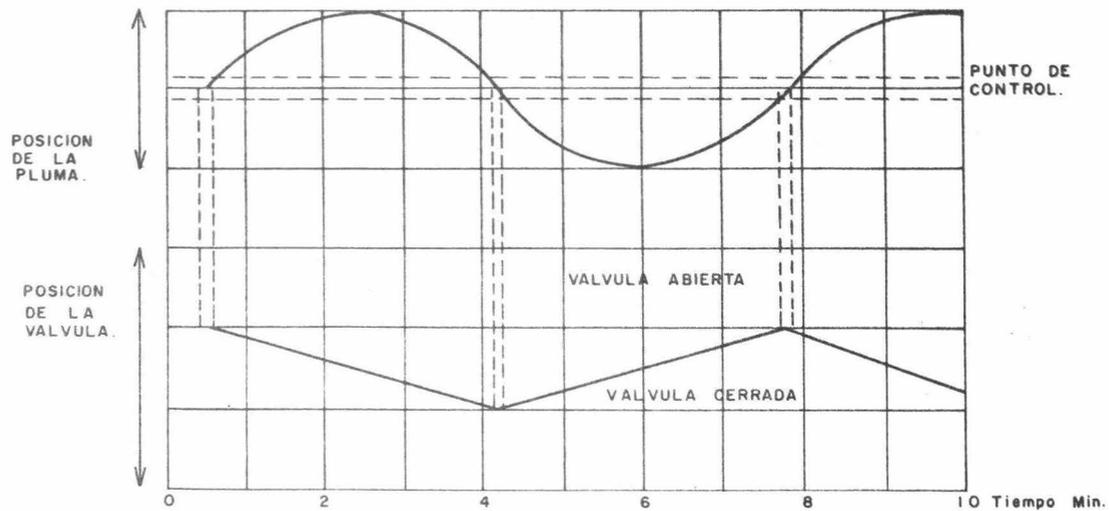


FIGURA II - 2

la desviación y reacciona solamente en el tiempo de la desviación, la velocidad es constante.

Control flotante de velocidad proporcional.

Esta forma de control, es aquella en la cual el elemento final de control se mueve a una velocidad que depende de la magnitud de la desviación. Esto es, si la variable aumenta en una cierta cantidad sobre el punto de control, la válvula empieza a cerrarse a una velocidad constante. Si la desviación se dobla, la válvula se mueve a una velocidad doble y cuando la variable está en el punto de control, la válvula no se mueve. La respuesta del controlador a un cambio dado se muestra en la Figura -- II-3A, o el controlador responde a un cambio estable como se observa en la Figura II-3B.

Control proporcional.

Es aquél en el cual, el elemento final de control se posiciona en proporción a la magnitud de la variable controlada. La acción de la variable, es simplemente repetida y amplificada en la válvula. Banda proporcional, es el por ciento de escala que la variable debe recorrer para mover el elemento final de control de una posición extrema a otra.

Durante el control de la temperatura se observa que cuando se tiene una banda proporcional angosta, sólo se requiere un ---

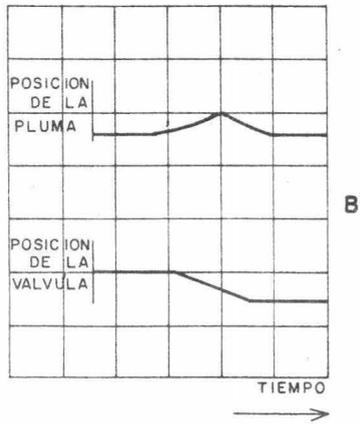
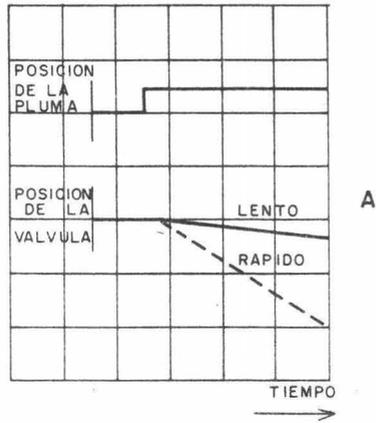


FIGURA II-3

pequeño cambio en la variable para operar la válvula de control en su carrera total. Cuando la banda es ancha, se requiere un cambio grande en la variable controlada para mover la válvula de control en toda su carrera.

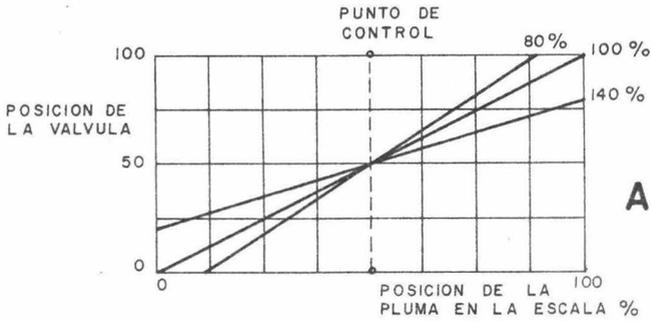
En la Figura II-4A puede verse la relación entre la variable controlada y la posición de la válvula para diferentes bandas proporcionales. Cuando la banda proporcional es más del 100% es imposible abrir o cerrar la válvula completamente aún cuando la variable controlada se sitúe en cero o en el 100% de la escala del controlador.

Con el reajuste manual del controlador, se puede variar la abertura de la válvula cuando la variable controlada está en el punto de control. En la Figura II-4A, la válvula está en un 50% abierta cuando la variable está en el punto de control. Esto puede variar y puede ser necesario mantener cualquier abertura en la válvula para un valor particular del punto de control. La ecuación de la forma de control proporcional en función de la posición de la válvula, puede obtenerse sabiendo que la señal de salida del controlador es directamente proporcional al error:

$$p = \frac{1}{b} e + P_0$$

$$e = v - c$$

$$p = \frac{1}{b} (v - c)$$



EFFECTO DE LA BANDA PROPORCIONAL.

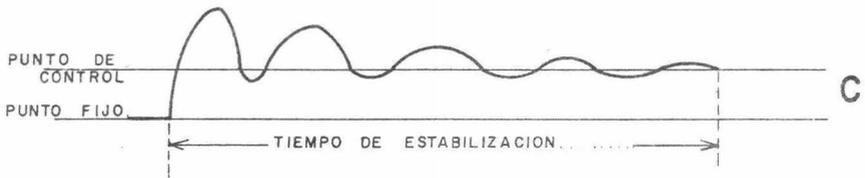
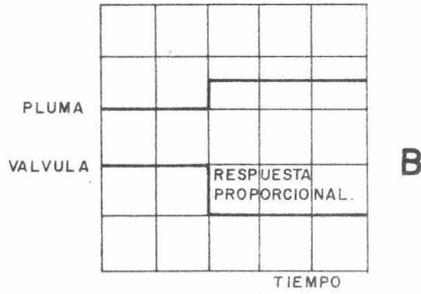


FIGURA II - 4

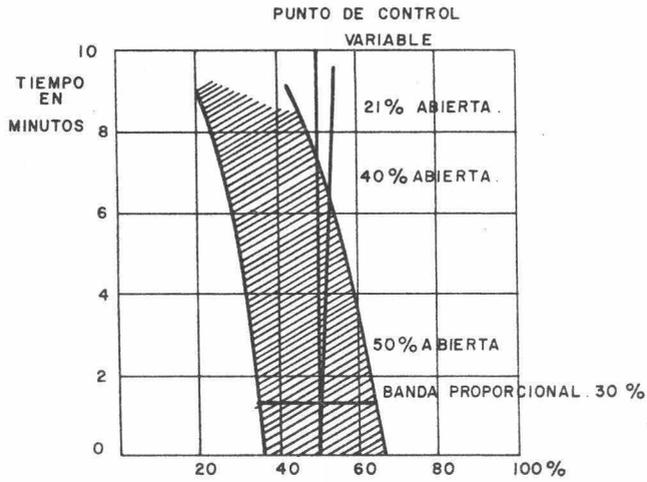
Control proporcional más reajuste.

El control flotante de velocidad proporcional se combina con el control proporcional y la combinación se conoce con el nombre de control proporcional más reajuste.

En el control proporcional, es necesario ajustar la amplitud de la banda proporcional para diferentes aberturas a la válvula de control cuando se tiene una desviación de la variable controlada. Este ajuste se hace automático por medio de la acción del controlador y, la combinación se conoce entonces con el nombre de control proporcional más reajuste. En otras palabras, el reajuste del controlador corre la banda proporcional de un lado a otro de la escala hasta obtener una abertura de la válvula tal, que vuelve la variable al punto de control.

En la Figura II-5, la línea vertical representa el punto de control y la zona rayada representa la banda proporcional.

La abertura de la válvula está dada por la posición de la variable en la banda proporcional. En un principio la variable está en el punto de control y la válvula está abierta a la mitad, pero al tiempo en que la variable se empieza a salir de su punto de control, la acción del reajuste, corre la banda proporcional con el objeto de que la válvula disminuya su abertura haciendo volver a la variable al punto de control.



ESCALA DEL CONTROLADOR

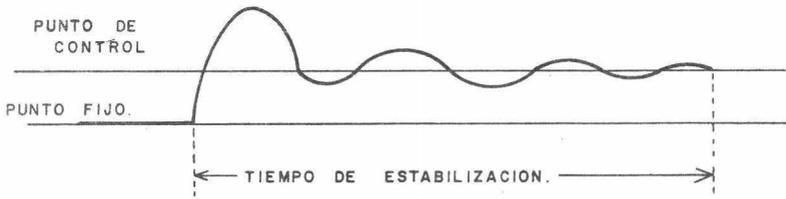


FIGURA II - 5

De aquí que la ecuación del controlador proporcional más --- reajuste viene a ser la suma de las dos respuestas individuales.

Control proporcional más reajuste, más derivativa.

Algunas veces al controlador proporcional, con o sin reajuste se le añade la acción derivativa. Esta acción derivativa, se puede definir como la respuesta del control, con la cual la posición de la válvula es proporcional a la velocidad de cambio de la desviación.

Se tiene que añadir otro término en la ecuación del controlador proporcional con reajuste, la cual ilustra el efecto de la velocidad de cambio de la variable sobre la posición de la válvula:

$$p = \frac{1}{b} (v-c) + \frac{r}{b} \int_0^t (v-c) + (q-b) \frac{dv}{dt} + K_v$$

Siendo: b , la banda proporcional afectando a todos los términos.

Finalmente tenemos, que la aplicación de la forma de control se elige de acuerdo al proceso por controlar, su velocidad de reacción, de los atrasos de transmisión y tiempo muerto, así como también, de la clase de variable por controlar.

III.- ESTUDIO DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE

- 1.- Tipo de control actual
- 2.- Cuantificación
- 3.- Costo del sistema actual

1.- TIPO DE CONTROL ACTUAL

El control actual llevado en la fábrica es de dos formas:

A.- Control manual: Este consiste en utilizar un pequeño - recipiente exactamente cubicado, el cual se coloca a - la entrada del combustible hacia los quemadores, se to - ma el tiempo que tarda en llenarse dicho recipiente y así se determina el gasto.

$q = Q \rho$ Siendo: q , gasto en masa, Kg./Seg.

Q , gasto en volúmen, Cm^3/Seg .

ρ , densidad, Kg./Cm^3

B.- Control por diferencia de nivel en los tanques de ali - mentación a los hornos: Consiste en marcar el nivel -- original de los tanques de alimentación de combustible para después observar el cambio de dicho nivel en fun - ción del tiempo en que se lleva a cabo el proceso. En el apéndice A se incluyen los gastos calculados en es - ta forma (Tablas 1 y 2).

2.- CUANTIFICACION

La cuantificación del combustible necesario por tonelada de -- producto, para yeso A y yeso B, se hará en la siguiente sección y a la vez se hará un balance de calor necesario para la ----

obtención de los mismos bajo dos condiciones:

A.- Condiciones ideales: Los cálculos se van a hacer en -- base a dos tipos de yeso.- Yeso A y Yeso B. Por ser -- éstos los de mayor producción y desde luego de mayor -- consumo.

Bajo estas condiciones, vamos primeramente a calcular estequiométricamente la cantidad de agua en el yeso natural o crudo ($C_a SO_4 \cdot 2H_2O$).

$$\text{Peso molecular del } C_a SO_4 \cdot 2H_2O = 172.17$$

$$\text{Peso molecular del } C_a SO_4 \cdot \frac{1}{2} H_2O = 145.15$$

$$\text{Peso molecular del } C_a SO_4 = 136.14$$

$$\text{Peso molecular del } H_2O \begin{cases} 2H_2O & = 36 \\ \frac{1}{2} H_2O & = 9 \end{cases}$$

Por cada 172.17 Kg. de sulfato de calcio bihidratado -- que se alimentan, se obtienen 145.15 Kg. de sulfato de calcio semihidratado y 27.02 Kg. de agua, si es que el mineral es 100% puro. En este tipo de mineral tenemos, expresando en por ciento la cantidad de agua:

Agua de hidratación contenida en la alimentación:

$$\frac{36 \times 100}{172.17} = 20.9 \%$$

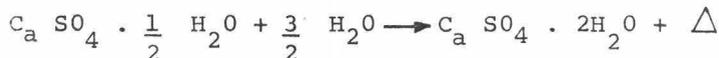
Este mineral en México se le encuentra con una pureza

del 75%, en base a ello se tiene que la cantidad de --
agua en por ciento es:

$$\frac{9 \times 75}{145.15} = 4.65 \%$$

Es de hacer notar que entre los yesos A y B existen di
ferencias tales como: La dureza del material después -
de fraguado, la finura, el agua de cristalización y su
tiempo de fraguado, etc.

El fraguado o endurecimiento se debe a la disolución -
de los cristales del semihidrato en agua, con la recris
talización simultánea del bihidrato según la reacción:



La recristalización se debe a que el bihidrato es me--
nos soluble que el semihidrato, luego entonces la solu
ción de bihidrato se sobresatura, el exceso de soluto
se separa en forma de cristales de sulfato de calcio -
bihidratado y el semihidrato continúa disolviéndose.

Se tomaron muestras de estos yesos y se llevaron al la
boratorio para determinar el contenido de agua. Los --
datos se muestran en la tabla 3 del apéndice A.

YESO A

En este caso, es necesario deshidratar el mineral, de 75% de -

pureza y con 4.65% de humedad, hasta alcanzar una humedad del 3.65%, por lo cual es necesario eliminar 0.9% de agua. Hay -- que tomar en cuenta el contenido de agua libre en el yeso cru do, aunque es sumamente bajo, pues oscila entre 0.3 y 0.5%, - dependiendo de la temporada del año y condiciones climatológi cas: Tomando el último valor se tiene para una tonelada de -- alimentación:

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de producto} \\ \text{que se obtiene:} \end{aligned} = M \frac{[(1 - H_a) (1 - H_s)]}{(1 - H_p)} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{D o n d e:} \quad M &= 1000 \text{ Kg.} \\ H_a &= 0.5 \% \\ H_s &= 15.5 \% \\ H_p &= 3.75 \% \end{aligned}$$

Sustituyendo datos:

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de producto} \\ \text{que se obtiene:} \end{aligned} = 1000 \frac{[(1.000 - 0.005) (1.000 - 0.156)]}{(1 - 0.0375)}$$

$$= 872.5 \text{ Kg. y } 127.5 \text{ Kg. de agua.}$$

La eficiencia del proceso es:

$$\frac{872.5 \text{ Kg. de producto}}{1000 \text{ Kg. de yeso crudo}} \times 100 = 87.25 \%$$

Por lo tanto, para la obtención de una tonelada de producto - se deberán consumir:

$$\frac{1000}{0.8725} = 1,146.13 \text{ Kg. de Yeso crudo}$$

YESO B

El mineral tiene la misma pureza o sea, es la misma materia que para el Yeso A, 75%. Sólo que se requiere una humedad del 3.01 %, por lo cual es necesario eliminar 1.65 % de agua. Lo mismo que para el Yeso A, hay que tomar en cuenta el agua libre en el yeso crudo.

Aplicando la fórmula (1) se tiene:

$$M = 1000 \text{ Kg.}$$

$$H_a = 0.5 \%$$

$$H_s = 15.6 \%$$

$$H_p = 3.01 \%$$

Sustituyendo datos:

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de producto} \\ \text{que se obtiene} &= 1000 \left[\frac{(1.000 - 0.005)(1.000 - 0.156)}{(1 - 0.0301)} \right] \\ &= 865.84 \text{ Kg. y } 134.16 \text{ Kg. de agua} \end{aligned}$$

La eficiencia del proceso es:

$$\frac{865.84 \text{ Kg. de producto}}{1000 \text{ Kg. de yeso crudo}} \times 100 = 86.58 \%$$

Por lo tanto, para la obtención de una tonelada de producto se deberán consumir:

$$\frac{1000}{0.8658} = 1,155 \text{ Kg. de yeso crudo.}$$

CALOR IDEAL

En esta sección se muestran los requerimientos de calor del -- proceso, los cuales se calcularon a partir de las relaciones -- estequiométricas, según se detalla en el apéndice B-1. En don-- de encontramos:

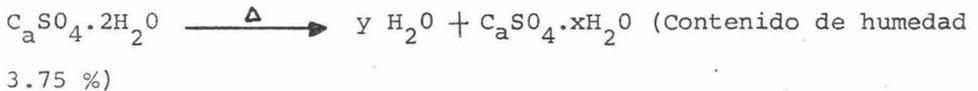
$$\Delta H = 69.05 \text{ Kcal/mole}$$

reacción ideal

Para el Yeso A

Encontramos que el mineral de 75 % de pureza se representa de la siguiente manera:

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Contenido de humedad 4.65%). Para nuestro caso, -- yeso tipo A:



$$x = \frac{0.5 \times 3.75}{4.65} = 0.403 \quad : \quad y = 1.597$$

Quedando la siguiente reacción química para el Yeso A:



Con la gráfica III-1 y los datos del apéndice B-2 tenemos:

$\Delta H_r = - 102.96 \text{ Kcal/mole.}$
 reacción para el yeso A

Para el Yeso B

Encontramos que el mineral de 75 % de pureza se representa de la siguiente manera:

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Contenido de humedad 4.65 %). Para nuestro caso, - yeso tipo B:

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\Delta} y \text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Contenido de humedad -- 3.01 %).

$$x = \frac{0.5 \times 3.01}{4.65} = 0.323 \quad ; \quad y = 1.677$$

Quedando la siguiente reacción química para el yeso B:



Con la gráfica III-1 y con los datos del apéndice B-3 tenemos:

$\Delta H_r = - 103.42 \text{ Kcal/mole}$
 reacción para el yeso B

B.- Condiciones reales: Los datos que son necesarios para el cálculo de las condiciones reales son:

- a) Producción.- La producción por día que se obtiene - de los rayos A y B. La cual se muestra en la tabla 5 del apéndice A.
- b) Consumo de combustible por día y calor de combustión del mismo.

GRAFICA PARA ENCONTRAR EL ΔH FORMACION PARA EL YESO "A" Y EL YESO "B"

CONDICIONES:
T=25°C.
P=1 ATM.

ΔH_f
K Cal
mole

- 450
- 400
- 370
- 365
- 350
- 300

CANTIDAD DE
2 AGUA EN EL YESO

ΔH CANTIDAD DE AGUA
K Cal/mole EN EL YESO

-479.33	2
-370.00	0.403
-376.13	0.50
-365.00	0.323

GRAFICA III-1

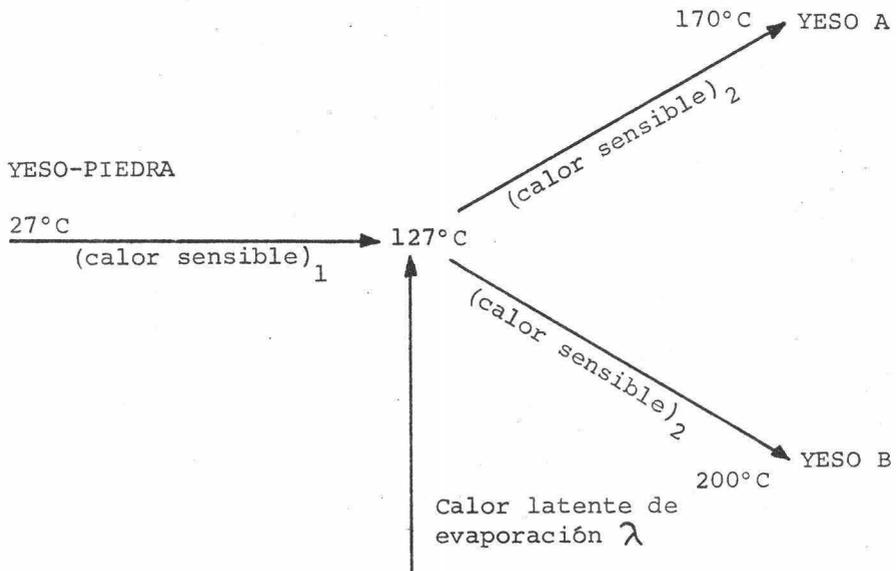
El consumo de combustible que se obtuvo durante un período de 5 días fué de 3,856.5 Lt/día. El combustible que se usa en la fábrica es el petróleo pesado, así clasificado por Petróleos Mexicanos, el cual presenta características señaladas en el apéndice B-4.

Si, $Q_c = M P_c$ sustituyendo datos tenemos:

$$Q_c = 3,829.8 \text{ Kg./día} \times 9,702 \text{ Kcal/Kg.}$$

$$Q_c = 37,156,719.6 \text{ Kcal/día}$$

c) Calores reales para el Yeso A y el Yeso B.



El calor latente de evaporación del agua se ha tomado a 127°C . Por ser ésta, según datos experimentales, la temperatura media a la cual el agua de cristalización se desprende.

Calor sensible: $Q_s = M_m C_p \Delta T$

Calor latente: $Q_l = M_a \lambda$

Calor total = Calor sensible + Calor latente.

$$Q_t = Q_s + Q_l$$

$$Q_t = M_m C_p \Delta T + M_a \lambda$$

YESO A

Utilizando las fórmulas anteriores para calcular el calor sensible en la primera parte (Q_{s1}), el calor latente (Q_l) y el calor sensible en la segunda parte (Q_{s2}) del diagrama anterior, se tiene:

$$(1) \quad Q_{s1} = M_m C_p \Delta T \quad M_m = 1,146.13 \text{ Kg.}$$

$$C_p = 0.26$$

$$Q_{s1} = 1,146.13 \times 0.26 \times 100$$

$$Q_{s1} = 29,799.38 \text{ Kcal}$$

$$(2) \quad Q_l = M_a \lambda$$

$$Q_l = 146.13 \times 520$$

$$Q_l = 75,987.6 \text{ Kcal}$$

$$(3) \quad Q_{s2} = 1,146.13 \times 0.26 \times 43$$

$$Q_{s2} = 12,813.73 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor total} = Q_{s1} + Q_{s2} + Q_l$$

$$= 118,600.71 \text{ Kcal/tonelada de producto.}$$

YESO B

$$(1) \quad Q_{sl} = M_m C_p \Delta T \quad M_m = 1,155 \text{ Kg.}$$

$$C_p = 0.26$$

$$Q_{sl} = 1,155 \times 0.26 \times 100$$

$$Q_{sl} = 30,030 \text{ Kcal}$$

$$(2) \quad Q_l = M_a \lambda$$

$$Q_l = 155 \times 520$$

$$Q_l = 80,600 \text{ Kcal}$$

$$(3) \quad Q_{s2} = 1,155 \times 0.26 \times 73$$

$$Q_s = 21,921.9 \text{ Kcal}$$

Calor total = 132,551.9 Kcal/tonelada de producto

d) Relación entre calores consumidos reales y la producción para obtener el calor necesario por día de los yesos.

YESO A

Toneladas de A X el calor real = El calor necesario para obtener la producción de A --
día de A por día.

$$84.435 \text{ Ton/día} \times 118,600.71 \frac{\text{Kcal}}{\text{Ton}} = Q_A$$

$$10'014,050 \text{ Kcal/día} = Q_A$$

YESO B

$\frac{\text{Toneladas de B}}{\text{día}} \times \text{el calor real de B} = \text{El calor necesario para -- obtener la producción de B por día.}$

$$25.054 \text{ Ton/día} \times 132,551.9 \frac{\text{Kcal}}{\text{Ton}} = Q_B$$

$$3'320,955 \text{ Kcal/día} = Q_B$$

e) Calor de reacción real.

Es el calor que se necesita para producir el Yeso A y el Yeso B por día:

(El calor necesario para obtener la producción diaria de yeso A) + (el calor necesario para obtener la producción diaria de yeso B) = Calor de reacción real.

$$(10'014,050 \text{ Kcal/día}) + (3'320,955 \text{ Kcal/día}) = Q_{RR}$$

$$13'335,005 \text{ Kcal/día} = Q_{RR}$$

f) Calor perdido por radiación, por conducción y por convección, (Q_{RCC}).

$Q_{RCC} = (\text{Calor total de combustión del petróleo quemado}) - (\text{el calor de reacción real}).$

$$Q_{RCC} = (37'156,719.6) - (13'335,005)$$

$$Q_{RCC} = 23'821,714.6 \text{ Kcal/día.}$$

g) Calor perdido por tonelada.

Se ha obtenido el calor perdido en una producción de varias -- toneladas, vamos a ver cuánto se pierde en una tonelada:

$\frac{\text{Calor perdido}}{\text{Número total de toneladas}} = \text{Calor perdido por tonelada}$

$$\frac{23'821,714.6 \text{ Kcal/día}}{109.489 \text{ Ton/día}} = Q_p$$

$$217.571 \frac{\text{Kcal}}{\text{Ton}} = Q_p$$

h) Calor necesario para producir el Yeso A y el Yeso B.

YESO A

(Calor ideal de A) + (Calor perdido por tonelada) = Calor total para producir A.

$$\begin{aligned} - 673.2 \text{ Kcal/Ton} + 217.571 \text{ Kcal/Ton} &= Q_{TA} \\ - 455.63 \text{ Kcal/Ton} &= Q_{TA} \end{aligned}$$

YESO B

(Calor ideal de B) + (Calor perdido por tonelada) = Calor total para producir B.

$$\begin{aligned} - 677 \text{ Kcal/Ton} + 217.571 \text{ Kcal/Ton} &= Q_{TB} \\ - 459.43 \text{ Kcal/Ton} &= Q_{TB} \end{aligned}$$

i) Calor necesario por día para producir el Yeso A y el Yeso B.

YESO A

(Calor total para producir A) X (Número de toneladas por día de A) = Calor por día para producir A.

$$- 455.63 \text{ Kcal/Ton} \times 84.435 \text{ Ton/día} = Q_a$$

$$38,471.12 \text{ Kcal/día} = Q_a$$

YESO B

(Calor total para producir B) X (Número de toneladas por día - de B) = Calor por día para producir B.

$$- 459.43 \text{ Kcal/Ton} \times 25.054 \text{ Ton/día} = Q_b$$

$$11,510.56 \text{ Kcal/día} = Q_b$$

j) Consumo de petróleo para la producción del Yeso A y del Yeso B.

Suponiendo una combustión total, el petróleo se convierte en CO_2 , tenemos la siguiente relación para la eficiencia de aprovechamiento del calor:

$$x = \frac{13'335,005}{37'156,719.6} \times 100 = 35.9 \%$$

Si dividimos el calor necesario para obtener los yesos entre la eficiencia, nos da el calor real de operación por día:

$$\frac{10'014,050}{0.359} = 27'894,000 \text{ Kcal/día para el Yeso A.}$$

Para el Yeso B sería la diferencia entre ése valor y el del combustible:

$$\begin{array}{r} 37'156,719.6 \\ - \underline{27'894,000.0} \\ 9'262,719.6 \text{ Kcal/día} \end{array}$$

$$Q_c = M P_c$$

$$M = \frac{27'894,000 \text{ Kcal/día}}{9,702 \text{ Kcal/día}} = 2,875 \text{ Kg./día}$$

El consumo de combustible para producir el Yeso A es de 2,875 Kg./día, y puesto que el consumo total es de 3,856.5, la diferencia o sea 981.5 Kg/día se utilizan en la producción del yeso B.

A continuación podemos determinar el consumo de combustible -- por tonelada de producto en cada caso.

YESO A

$$\frac{2,875 \text{ Kg/día}}{84.435 \text{ Ton/día}} = 34.05 \text{ Kg/Ton}$$

YESO B

$$\frac{981.5 \text{ Kg/día}}{25.054 \text{ Ton/día}} = 39.17 \text{ Kg/Ton}$$

3.- COSTO DEL SISTEMA ACTUAL

El costo del sistema actual se va a calcular bajo los costos de producción por ser éstos los que más directamente afectan al cálculo del control automático y hacer una comparación entre el sistema actual y el nuevo sistema.

Los costos de producción son: a) Materiales (materia prima)

b) Mano de obra directa.

c) Gastos de fabricación.

a) MATERIALES (Materia prima):

- Compra de materia prima	\$ 32,468.49
- Fletes de materia prima	<u>3,060.00</u>
	\$ 35,528.49 Mensuales

b) MANO DE OBRA DIRECTA:

1.- Transporte de materia prima:

- Sueldos, salarios y horas ex- tras.	\$ 6,940.00
- Vacaciones	-
- Gratificaciones ordinarias	270.00
- Cuotas al Seguro Social	390.00
- Seguro de vida y accidentes	<u>77.00</u>
	\$ 7,677.00 Mensuales

2.- Mantenimiento:

- Sueldos, salarios y horas ex- tras.	\$ 4,867.30
- Vacaciones	230.00
- Gratificaciones ordinarias	154.00
- Cuotas al Seguro Social	615.00
- Ropa de trabajo	<u>-</u>
	\$ 5,862.30 Mensuales

3.- Producción:

- Sueldos, salarios y horas ex-	\$ 12,681.40
- Vacaciones	2,800.00
- Gratificaciones ordinarias	2,610.00
- Comisiones al personal	4,300.60
- Indemnizaciones	1,540.00
- Cuotas al Seguro Social	7,289.20
- Cuotas Sindicales pagadas por la empresa.	345.00
- Servicio médico	230.00
- Fomento al deporte	120.00
- Ropa de trabajo	<u>1,150.00</u>
	\$ 33,066.20 Mensuales

Total de mano de obra directa = \$ 7,677.00 + 5,862.30 + -----
 33,066.20 = \$ 46,605.50 Mensuales.

c) COSTOS DE FABRICACION:

1.- Transporte de materia prima:

- Reserva, por depreciación de equipo de transporte.	\$ 17,770.00
- Combustible y lubricantes	3,605.00
- Impuestos	1,000.00

- Reparación y mantenimiento	\$ 5,685.89
	\$ 28,060.89 Mensuales
2.- Mantenimiento:	
- Combustibles y lubricantes	\$ 2,356.87
- Reparación y mantenimiento	<u>7,912.22</u>
	\$ 10,269.09 Mensuales
3.- Producción:	
- Reserva por amortización de - gastos de instalación.	\$ 230.00
- Reserva por depreciación de - edificio, construcciones e -- instalaciones.	692.00
- Reserva por maquinaria y equi po industrial.	2,770.00
- Reserva por depreciación de - equipo de transporte.	1,150.00
- Primas y finanzas diversas	210.00
- Mermas y roturas de envases	770.00
- Teléfono	204.95
- Luz y fuerza	8,626.75
- Combustible y lubricantes	<u>54,230.75</u>
	\$ 68,884.45 Mensuales

Total de costos de fabricación = \$ 28,060.89 + 10,269.09 +
 68,884.45
 = \$107,214.43 Mensuales.

COSTO TOTAL DE PRODUCCION = MATERIALES + MANO DE OBRA DIRECTA
 + COSTOS DE FABRICACION.

Costo total de producción = \$ 35,528.49 + 46,605.50 +
 107,214.43 = \$189,348.42 Mensuales

Para obtener el costo de producción por tonelada de producto,-
 es necesario hacer la siguiente relación:

- Producción por día: 109.489 Ton de producto.
- Producción mensual: 109.489 X 30 = 3,284.67 Ton.
- Costo de operación por tonelada de producto: $\frac{189,348.42}{3,284.67} = \57.64

por tonelada.

IV.- DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMATICO

IV.- DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMATICO

Bajo los siguientes puntos se hace el diseño del sistema de control automático:

- 1.- Determinar todas las variables en el sistema.
- 2.- Decidir cuál variable va a ser:
 - a) Controlada
 - b) Registrada solamente
 - c) Indicada y medida periódicamente
 - d) Cualquier medida no controlada
- 3.- Seleccionar el instrumento propio para medir y controlar la variable deseada.
- 4.- Después de un estudio del sistema, determinar las formas de control que necesita el controlador.
- 5.- Hacer un diagrama del instrumento.

Una variable de proceso es cualquier condición o estado del material (o del medio que le rodea) sujeto a cambios.

Para controlar un proceso, es necesario analizar las variables presentes, determinar las variables independientes y aquellas que por su marcada influencia en los resultados del proceso requieren control automático.

Clasificación de las variables del proceso atendiendo:

1.- Al estado de energía del material: Temperatura, presión, vacío, electricidad, sonido y radiación.

2.- A las relaciones de cantidad o grado de flujo entre los materiales del proceso: Flujo de fluidos, nivel de líquidos, - peso, velocidad, espesor, etc.

3.- A las características físicas y químicas del material:- densidad y gravedad específica, humedad, contenido de humedad en sólidos, poder calorífico, consistencia y viscosidad, conductividad térmica, etc.

Los constituyentes principales en todo sistema de control automático son dos:

1.- El proceso

2.- El control automático.

El sistema actual se puede observar en la figura IV-1. En la que se muestra como una persona se encarga del control de temperatura, manipulando para ello una válvula, abriendo o cerrando según la variación de temperatura.

Para efectuar el control, es condición que el proceso y el sistema de control se encuentren formando un circuito cerrado, como se ve en la figura IV-2.

La figura IV-3, es un diagrama de bloques de la figura IV-2, -

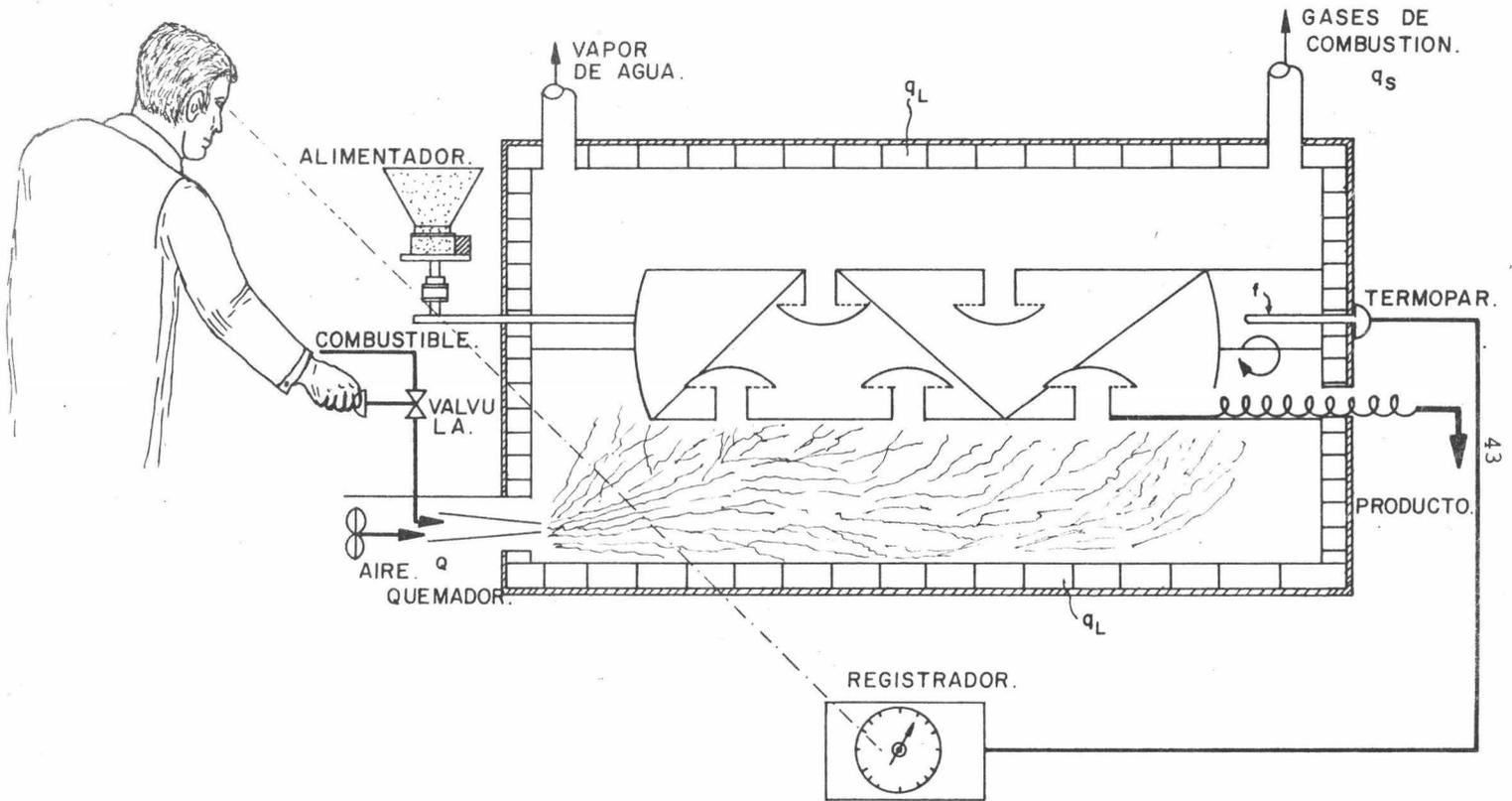


FIGURA. IV - I

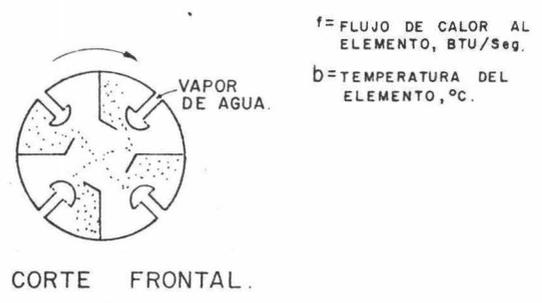
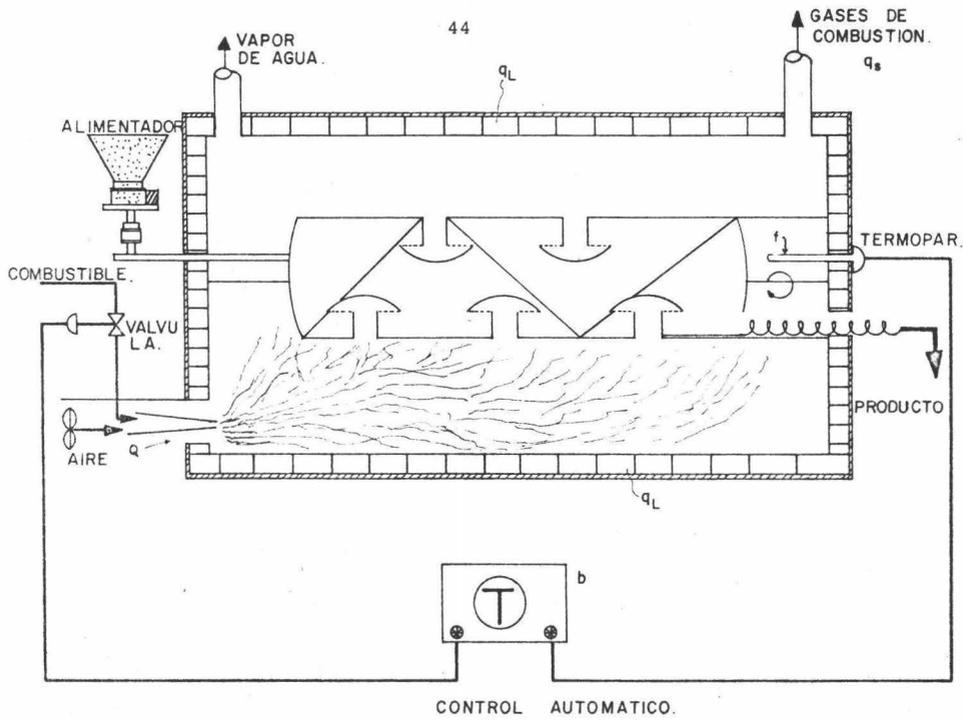


FIGURA. IV - 2

donde consideramos los siguientes conceptos:

1.- Entrada de referencia θ_i es una señal externa aplicada a un sistema de control por retroalimentación con el fin de ordenar al proceso una acción especificada. A menudo representa un comportamiento ideal de la salida del proceso.

2.- La señal impulsora e , también llamada error o acción de control, es la suma algebraica de la entrada de referencia θ_i más o menos (\pm), la retroalimentación primaria b .

3.- Los elementos de control g_1 , también llamados controladores, son los componentes requeridos para generar la señal de control apropiada m que se aplica al proceso.

4.- La variable manipulada m (señal de control), es esa cantidad o condición que los elementos de control g_1 aplican al proceso g_2 .

5.- El proceso g_2 , es una transformación física o fisicoquímica ejecutada por el equipo en el cual se tiene una variable por controlar.

6.- Una perturbación u , es una señal de entrada indeseable que afecta el valor de la salida controlada θ_o . Puede entrar al proceso sumándose con m ó a través de un punto intermedio.

7.- La salida controlada θ_o , es esa cantidad o condición del proceso que se controla.

8.- Los elementos de retroalimentación h , son los componentes que se requieren para establecer la relación funcional entre la señal de retroalimentación primaria b y la salida controlada θ_o .

9.- La señal de retroalimentación primaria b , es una señal que es función de la salida controlada θ_o y es suma algebraicamente a la entrada de referencia r para obtener la señal impulsora e .

Trayectoria directa.- Es la vía de transmisión desde la señal impulsora e hasta la salida controlada θ_o .

Trayectoria de retroalimentación.- Es la vía de transmisión desde la salida controlada θ_o hasta la señal de retroalimentación primaria b .

Consideraciones generales:

Un sistema de control consta de cierto número de elementos - conectados entre si, cada uno de ellos alimentado por una señal conocida como entrada y proporciona una señal denominada salida ó respuesta. Se trata de saber cómo varía una señal - con respecto al tiempo durante su paso a través de un elemento. Si la ecuación diferencial que relaciona la entrada con la salida del elemento, se expresa en términos del operador

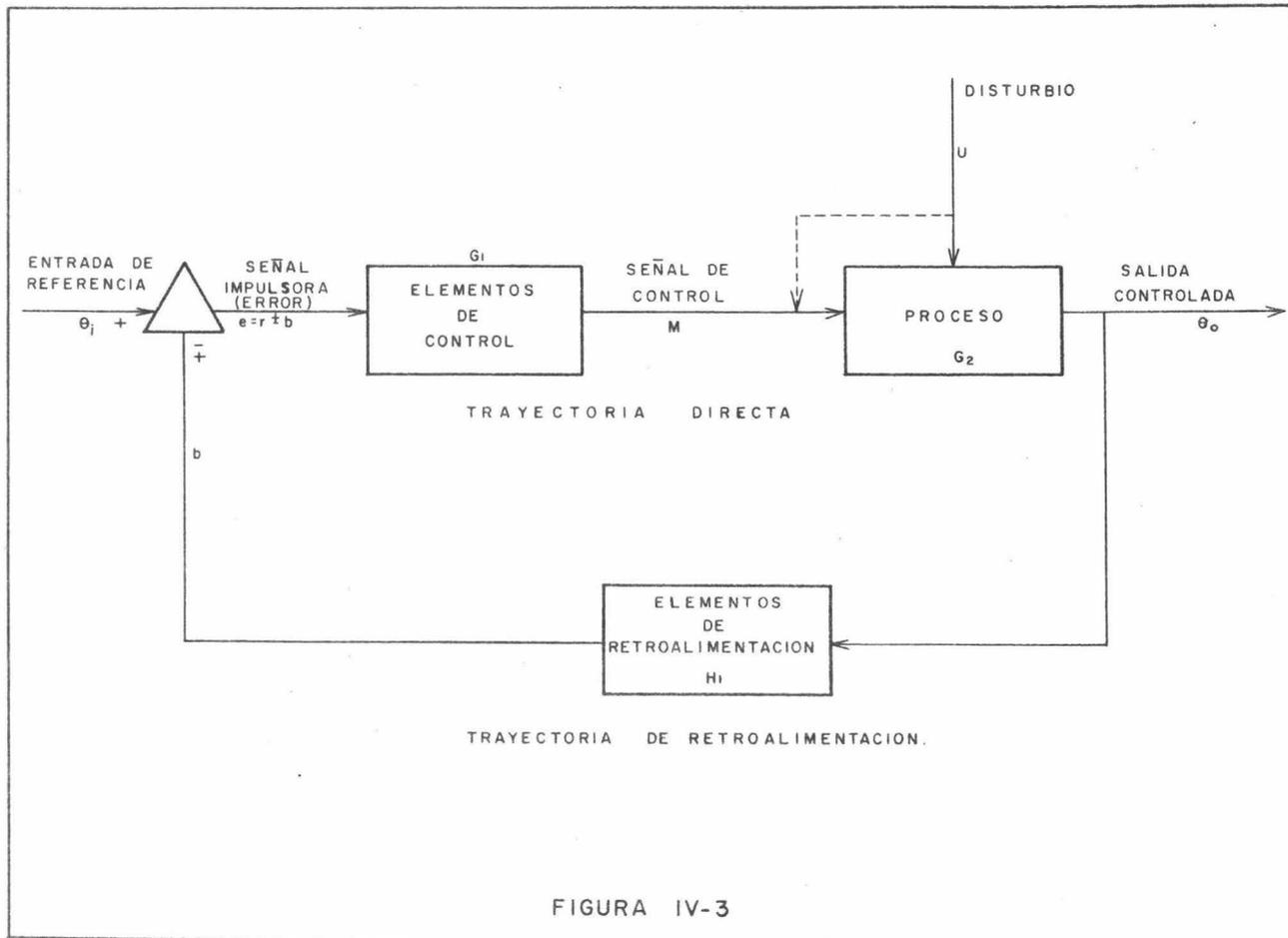


FIGURA IV-3

diferencial S (que significa d/dt), es posible expresar la salida como una función de S que actúa sobre la entrada. Esta función de S incluirá ciertos parámetros del elemento y se llama operador de transferencia simbolizado por TS .

La desviación del proceso a la salida con respecto al punto de control, es medida por el instrumento y comparada con el valor fijado; el aparato trasmite una señal a los medios de control y éstos actúan sobre el elemento final, corrigiendo el valor al puntero deseado de control.

El aparato de control automático, por si solo no controla el proceso, pero al conectar proceso y aparato en un ciclo, el proceso se controla por si mismo.

La figura IV-2, muestra el empleo de un termopar, de un controlador y de un registrador en el horno donde se desea controlar la temperatura.

El registrador es el controlador automático. La temperatura es la variable controlada. En tanto que el horno se denomina el medio controlado. El combustible mediante el cual se calienta el horno se conoce como el agente de control.

El termopar, que se denomina elemento primario forma parte de los medios de medición. En el instrumento se encuentran los medios de control, en este caso una unidad de control --

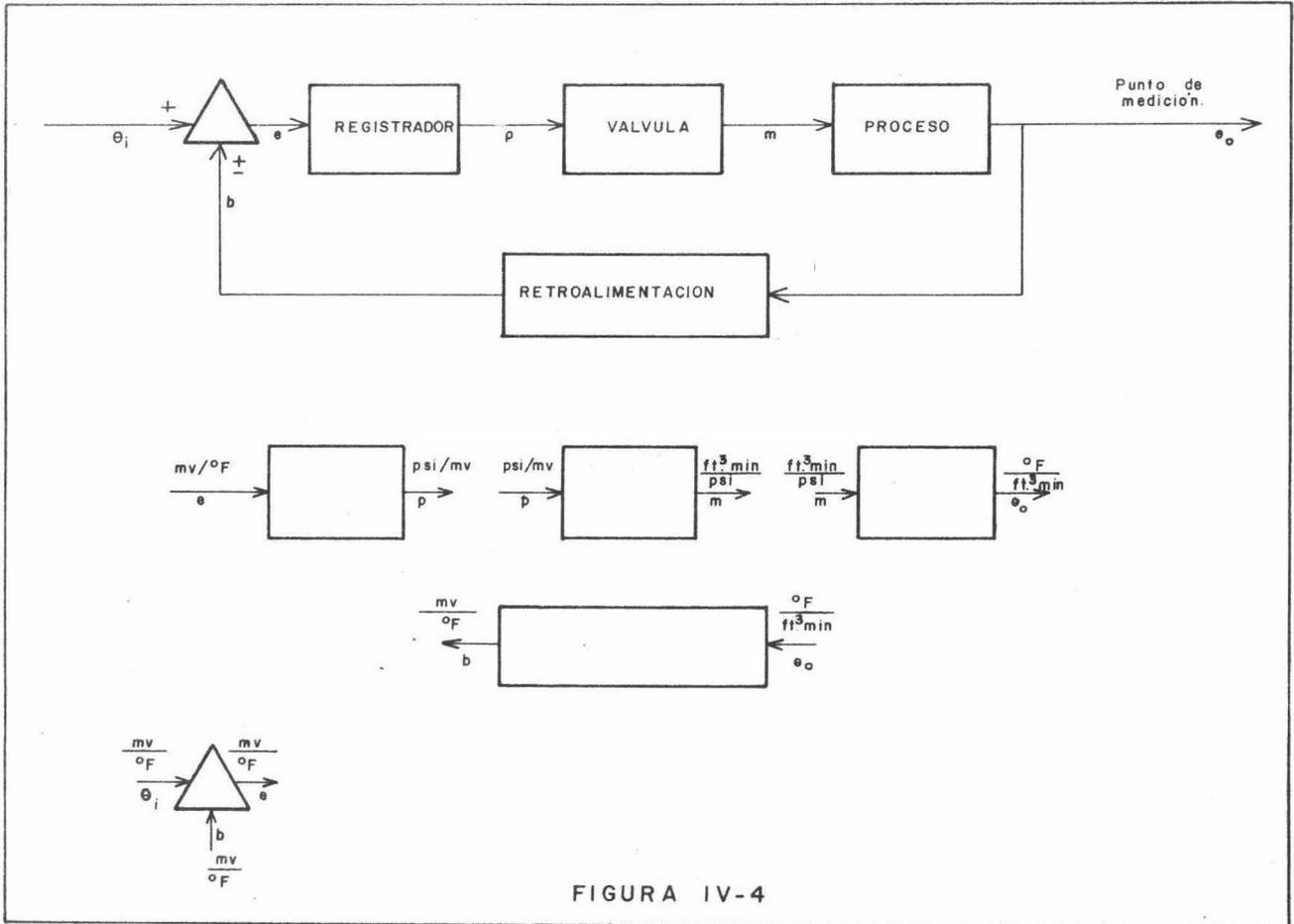


FIGURA IV-4

neumático que acciona el elemento final de control es una ---
 válvula de diafragma en la línea de combustible.

Todos los componentes del sistema para el control automático se observan en la figura IV-4.

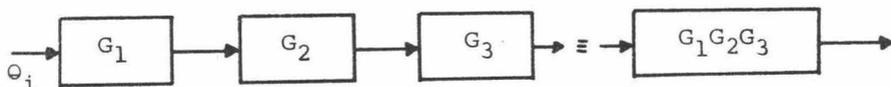
En la figura IV-4 se muestra lo siguiente:

- Variable del proceso, TEMPERATURA.
- Señal neumática-eléctrica de instrumentos, $\text{Kg}/\text{Cm}^2\text{-mv}$.
- Gasto-masa del proceso, Kg/Hr .

Para seleccionar el instrumento propio para medir y controlar la variable temperatura y determinar las formas de control -- que necesita el controlador, es necesario un modelo analítico para el diseño y el cálculo de la respuesta del sistema de -- control. Se hace la derivación de las ecuaciones para cada -- parte del diagrama de bloques de la figura IV-5. Donde cada - parte es representada por un bloque con una señal de entrada y una señal de salida. La relación entre la señal de entrada y la señal de salida de cualquiera de ellos es la función de transferencia. El tipo de ecuación dependerá del proceso que tiene lugar en el mismo. Para obtener la función de transferencia del circuito cerrado o razón de control, θ_o/θ_i , es necesario que el sistema sea reducido a lo siguiente, figura -
 IV-5:

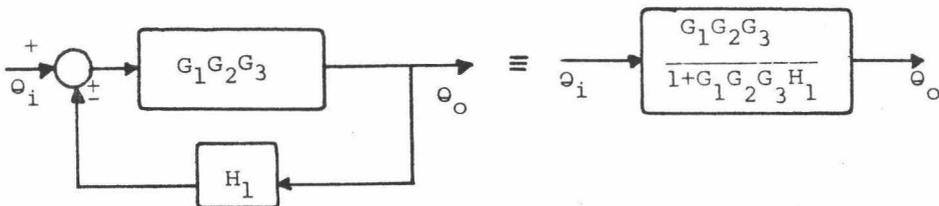
1.- $U = 0$, revela la magnitud del error cuando la variable se cambia solamente en el valor deseado.

2.- Combinación de bloques en cascada:



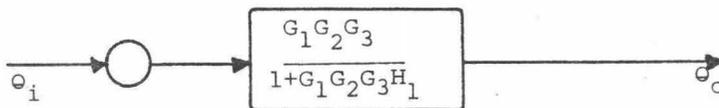
Ecuación: $\theta_o = (G_1G_2G_3) \theta_i$

3.- Eliminación del circuito menor, retroalimentación:



Ecuación: $\theta_o = \left(\frac{G_1G_2G_3}{1+G_1G_2G_3H_1} \right) \theta_i$

4.- Finalmente, los pasos anteriores 1, 2 y 3 nos sirven para lograr una forma canónica para la entrada:



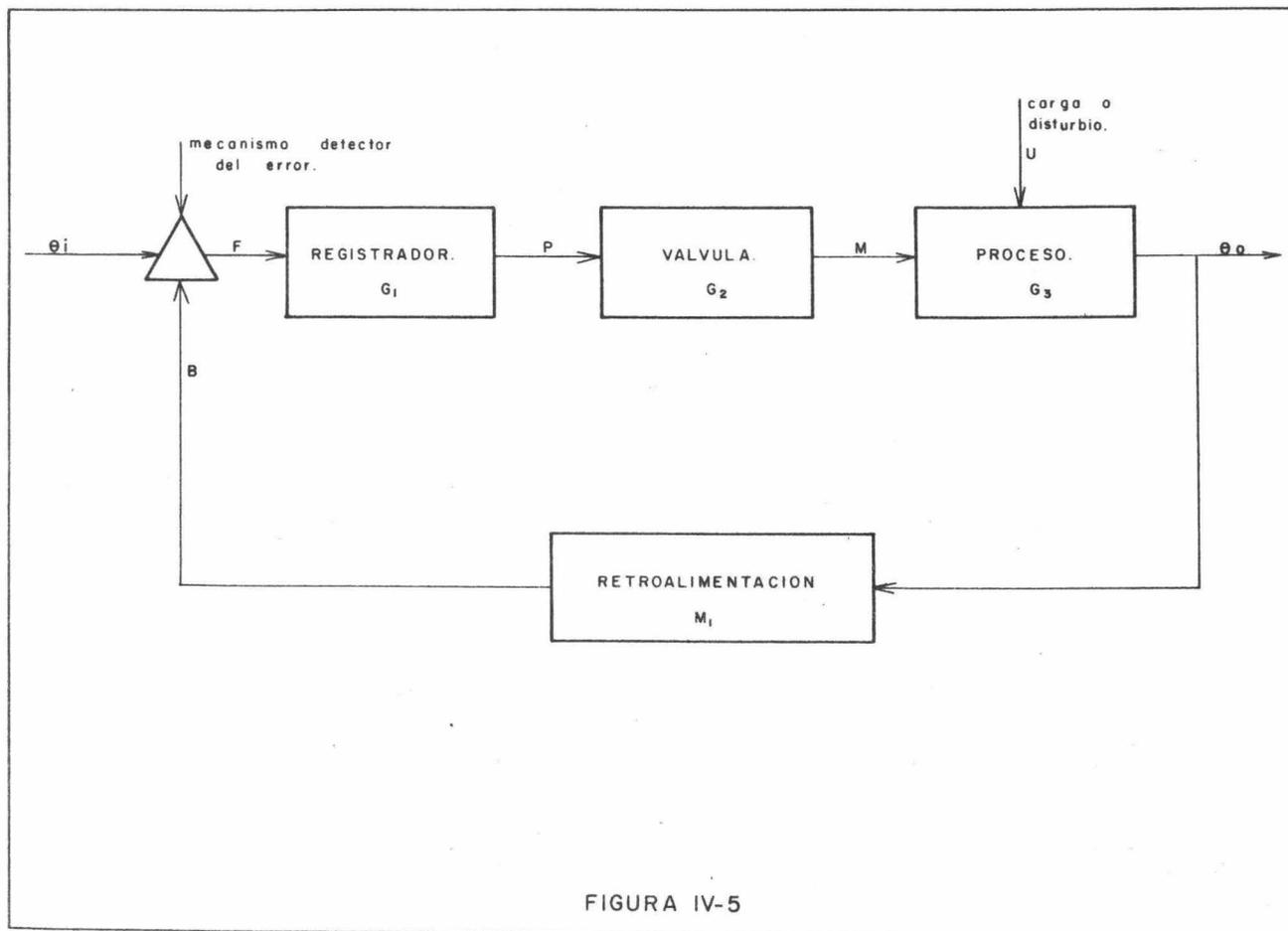


FIGURA IV-5

por lo que, la función de transferencia del sistema total es:

$\frac{\theta_o}{\theta_i}$ Función de transferencia del circuito cerrado o razón de control.

$$\frac{\theta_o}{\theta_i} = \frac{G_1 G_2 G_3}{1 + G_1 G_2 G_3 H_1} \quad (1)$$

Sistema de primer orden:

El proceso térmico posee características atribuidas a la capacitancia (calor específico y peso) y resistencia. Un proceso térmico, se distingue claramente de un proceso fluido, porque la resistencia y la capacitancia se distribuyen a través de la trayectoria de la transferencia de calor.

El proceso térmico de la figura IV-1, consiste de un horno calentado continuamente. Una mezcla de gas-aire se quema en el horno y representa una velocidad específica de adicción de -- calor θ_i .

La carga a calentar para la evaporación del agua, es el yeso-piedra. Este yeso se pasa continuamente a través del horno, - pues éste presenta una rotación y por medio de cuchillas horizontales hace que el material atraviese el horno. Hay pérdidas de calor por las paredes del horno y por la chimenea. La varia

ble a controlar es la temperatura a la cual se lleva a cabo - la calcinación del yeso A y B.

Si suponemos que la capacidad calorífica de la pared es despreciable, en cualquier instante la salida de flujo de calor I a través de la pared y la chimenea iguala al que entra al - horno.

Podemos escribir para la pared:

$$I = \frac{H_2 A (\theta_i - \theta_o)}{1}$$

$$I = \frac{\theta_i - \theta_o}{R} \quad (2)$$

Donde: $R = \frac{1}{AH_2}$ puede llamarse resistencia térmica de

la pared.

Para el flujo en el horno:

$$I = m P_1 d\theta_o/dt$$

$I = C d\theta_o/dt$ Donde: $C = m P_1$ es la capacidad calorífica del aire.

Las pérdidas por la chimenea se consideran una función de la velocidad del gas-aire y de la temperatura del horno:

$$q_s = f(\theta_i, \theta_o)$$

Entonces, la relación de cambios diferenciales es:

$$dq_s = \left(\frac{q_s}{\theta_i} \right) d\theta_i + \left(\frac{q_s}{\theta_o} \right) d\theta_o \quad \text{Por una pequeña fluc-}$$

tuación en el calor de entrada y en la temperatura del horno, las derivadas parciales anteriores son cercanamente constantes, por lo que:

$$q_s = K_1 \theta_i + K_2 \theta_o + M$$

Combinando las ecuaciones (2) y (3), eliminando I, tenemos:

$$\frac{\theta_i - \theta_o}{R} = C \, d\theta_o / dt$$

$$\text{Es decir:- } \theta_i - \theta_o = RC \, d\theta_o / dt$$

$$\theta_i - \theta_o = TS\theta_o \quad \text{siendo } S \text{ el operador diferencial y}$$

T igual a RC que evidentemente tiene las dimensiones de un -- tiempo, se conoce como la constante de tiempo del elemento.

Agrupando los términos en θ_i y θ_o en la ecuación, tenemos:

$$(1 + TS) \theta_o = \theta_i \quad (4)$$

Si diferenciamos al operador $\frac{1}{(1 + TS)}$ de tal modo que:

$$(1 + TS) \left[\frac{1}{(1 + TS)} \right] \theta_i = \theta_i. \quad \text{Por lo tanto, es obvio -}$$

que $\left[\frac{1}{(1 + TS)} \right] \theta_i$ sea la solución de la ecuación dife--
rencial. (4); es decir:

$$\theta_o = \frac{1}{(1 + TS)} \theta_i \quad (5)$$

A esta forma de operador de transferencia se le denomina retardo exponencial. Notemos que S aparece elevado a la primera potencia, de ahí que el retardo exponencial sea un operador de primer orden. Para esta forma térmica, T representa $\frac{1 \text{ m P}_1}{A H_2}$,

Una combinación de constantes físicas asociadas al elemento. - Si T es constante el elemento es lineal.

La ecuación (5) representa a G_3 en la figura IV-5.

Las ecuaciones diferenciales que representan las formas de control proporcional, integral y derivativa son:

PROPORCIONAL:	$p = \left(\frac{1}{b} \right) e$
INTEGRAL:	$p = f \int e \, dt$
DERIVATIVO:	$p = r \, de/dt$

Se acostumbra a utilizar letras mayúsculas para la función --- transformada de Laplace, reduciendo las ecuaciones a otra forma algebraica:

$$\text{PROPORCIONAL: } P = \frac{1}{BE} \quad \text{ó} \quad \frac{P}{E} = K_c \quad (6)$$

$$\text{INTEGRAL: } P = \left(\frac{f}{S} \right) E \quad \text{ó} \quad \frac{P}{E} = \frac{K_c}{T_i S} \quad (7)$$

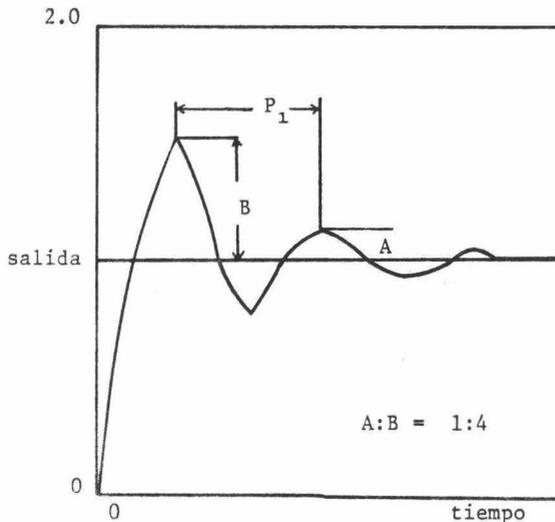
$$\text{DERIVATIVO: } P = rSE \quad \text{ó} \quad \frac{P}{E} = K \frac{T}{c} \frac{S}{d} \quad (8)$$

La combinación de las formas de control es con el fin de obtener mejores resultados: El control proporcional con su estabilidad inherente, el control integral de velocidad proporcional con su estabilización en el punto de control y el control derivativo sin tiempo reduce el período del ciclo estabilizándose la variable más rápidamente.

La respuesta de cada uno de estos controles es ajustable y la estabilidad de la variable depende del ajuste del controlador. Los procesos con gran tiempo muerto o atrasos en la transmisión pueden presentar varias dificultades para su control. Este tipo de atrasos elimina todo tipo de control, excepto el proporcional con integral. La banda proporcional debe ser excepcionalmente ancha y el integral muy lento para evitar un ciclaje continuo. Cuando hay cambios de carga hay una desviación excesiva y se requiere mucho para volver al punto de control. La aplicación del derivativo para contrarrestar el efecto del tiempo muerto y un control proporcional con integral reduce la desviación máxima, reduce a la mitad el período del ciclo, la variable controlada vuelve al punto de control en la cuarta parte del tiempo requerido sin el derivativo.

La respuesta derivativa o componente de velocidad se define - como la respuesta del control con la cual la posición de la - válvula puede ser proporcional a la velocidad de cambio de la desviación.

A fin de estudiar la acción dinámica de un controlador o registrador, se supone que éste no está aplicado a un proceso - y que a cierto movimiento de la pluma (que corresponde a cambios en la variable) corresponde un cambio en la señal correctiva del controlador. Estudiando la relación entre la entrada y la salida del controlador, se determina la forma de control y para llegar a determinarla en su mejor forma, ya que ésta - difiere de proceso a proceso, es necesario escoger el ajuste del controlador, tal que la curva de respuesta del sistema -- tenga una relación de amplitud o una relación de decadencia - de 1 : 4, lo cual lo podemos observar en la siguiente figura:



Para llevar a cabo el ajuste del controlador al proceso se cuentan con dos métodos:

1o. Los valores se determinan en un sistema de respuesta circuito cerrado con controlador automático.

2o. Los valores se determinan en un sistema de curva de respuesta-circuito abierto o llamada curva de reacción del proceso. (Para mayor detalle de estos métodos consultar la referencia 14).

Para un controlador con tres formas de control, la variable de salida θ_o , es la suma de cada forma:

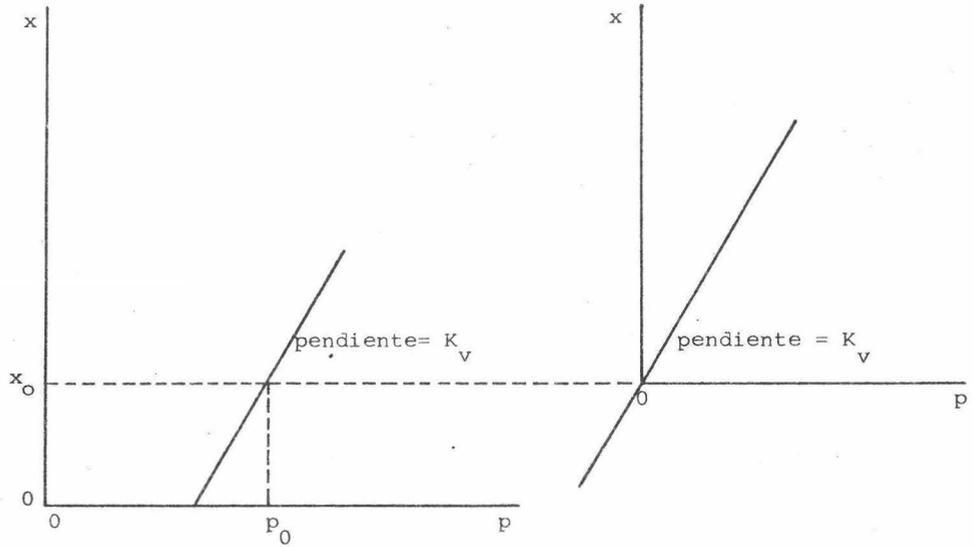
PROPORCIONAL MAS INTEGRAL, MAS DERIVATIVO, O SEA:

$$\theta_o = K_c \left[1 + \left(\frac{1}{T_i S} \right) + T_d S \right] E \quad \text{Esta ecuación describe}$$

un controlador ideal y sería igual a G_1 de la figura IV-5. Estas formas de control no son independientes una de otra ya que si se ajusta T_i , por ejemplo, afecta a K_c y a T_d . En suma, frecuentemente hay un tiempo muerto asociado con la forma proporcional, lo mismo sería a las otras dos formas.

Elemento final de control.

Hay muchas relaciones posibles entre la señal de salida y la señal de entrada para los elementos de control, que dependerán del elemento mismo y de su construcción. Para simplificar el -



ORIGINAL

VARIABLE DE DESVIACION

Figura IV-7

problema se considera que la señal de salida es directamente proporcional a la señal de entrada, también se considera un elemento de comportamiento lineal y rápida en su acción.

$$\begin{aligned} X &= K_v P \\ \frac{X}{P} &= K_v \quad (9) \end{aligned}$$

Gráficamente el comportamiento de una válvula quedaría, figura IV-7.

Elemento de medida, retroalimentación, H.

Anteriormente se ha definido en que consiste la retroalimentación y sólo queda determinar su ecuación. El medidor H convierte la variable retroalimentada b , tal que el controlador pueda determinarla y mandar su señal impulsora (error), e .

$$e = r - b$$

La variable retroalimentada b puede ser en este caso una señal eléctrica. Un elemento eléctrico convierte la variable controlada en alguna forma de cantidad eléctrica, tal como un voltaje o una corriente; por ejemplo el termopar convierte la temperatura a un voltaje de corriente directa.

Para determinar la ecuación de un sistema de retroalimentación se recurre a la ley de la conservación de la energía y a la transferencia de calor. El aumento de energía es igual al flu-

La ecuación (13), representa a H_1 de la figura IV-5.

El termopar instalado en el horno tiene un comportamiento de respuesta de primer orden según la figura IV-8:

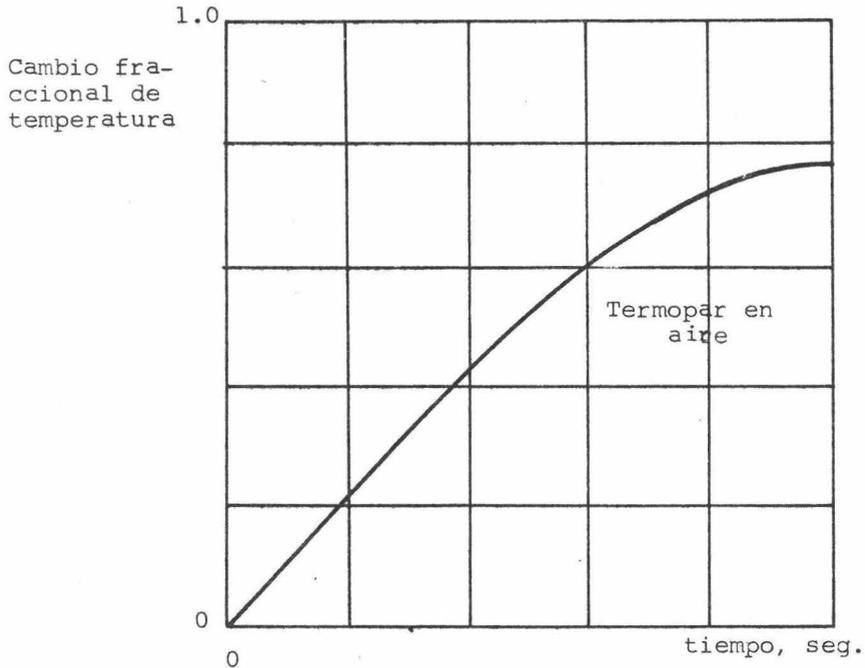


FIGURA IV-8

El sistema de control quedaría establecido bajo las siguientes ecuaciones y representando en un diagrama de bloques como se puede observar en la figura IV-9.

Para G_1 :

$$\frac{P}{E} = \frac{K_c}{T_i S} + K_c + K_c T_d \quad (14)$$

jo de energía, de la figura IV-2; en el elemento se tiene:

$$(WP_2) \theta_i = f \quad (10)$$

Por transferencia de calor, convección en el mismo elemento, - se tiene: $H a (\theta_i - \theta_o) = f \quad (11)$

Combinando las dos ecuaciones (10) y (11) se tiene:

$$W P_2 \theta_i - H a \theta_o = H a \theta_i$$

$$\theta_o = \frac{H a}{H a} \theta_i - \frac{W P_2}{H a} \theta_i$$

Por definición, la constante de tiempo, $T = \frac{W P_2}{H a}$, entonces:

$\theta_o = \theta_i - T \theta_i$ diferenciando y utilizando la transformada de Laplace tenemos:

$$\theta_o = \theta_i - T d\theta_i/dt$$

$$\theta_o = \theta_i - T S \theta_i$$

$$\theta_o = \theta_i (1 - TS) \quad (12)$$

Considerando al retraso muy pequeño, ya que el equipo está en si muy cerca, de tal manera que la señal no tiene que recorrer un espacio grande que influiría en su registro, entonces la -- ecuación (12) quedaría:

$$\theta_i = \frac{\theta_o}{(1 - TS)}$$

Por lo tanto, $\theta_i/\theta_o = K_m \quad (13)$

Para G_2 :

$$K_v$$

Para G_3 :

$$\frac{K_p}{(TS + 1)}$$

Para H_1 :

K_m (Se le usa cuando no se tiene un retraso con siderable por la capacidad calorífica del material de construc ción y por las características de transferencia de calor de -- las vecindades).

De la ecuación (1) se tiene:

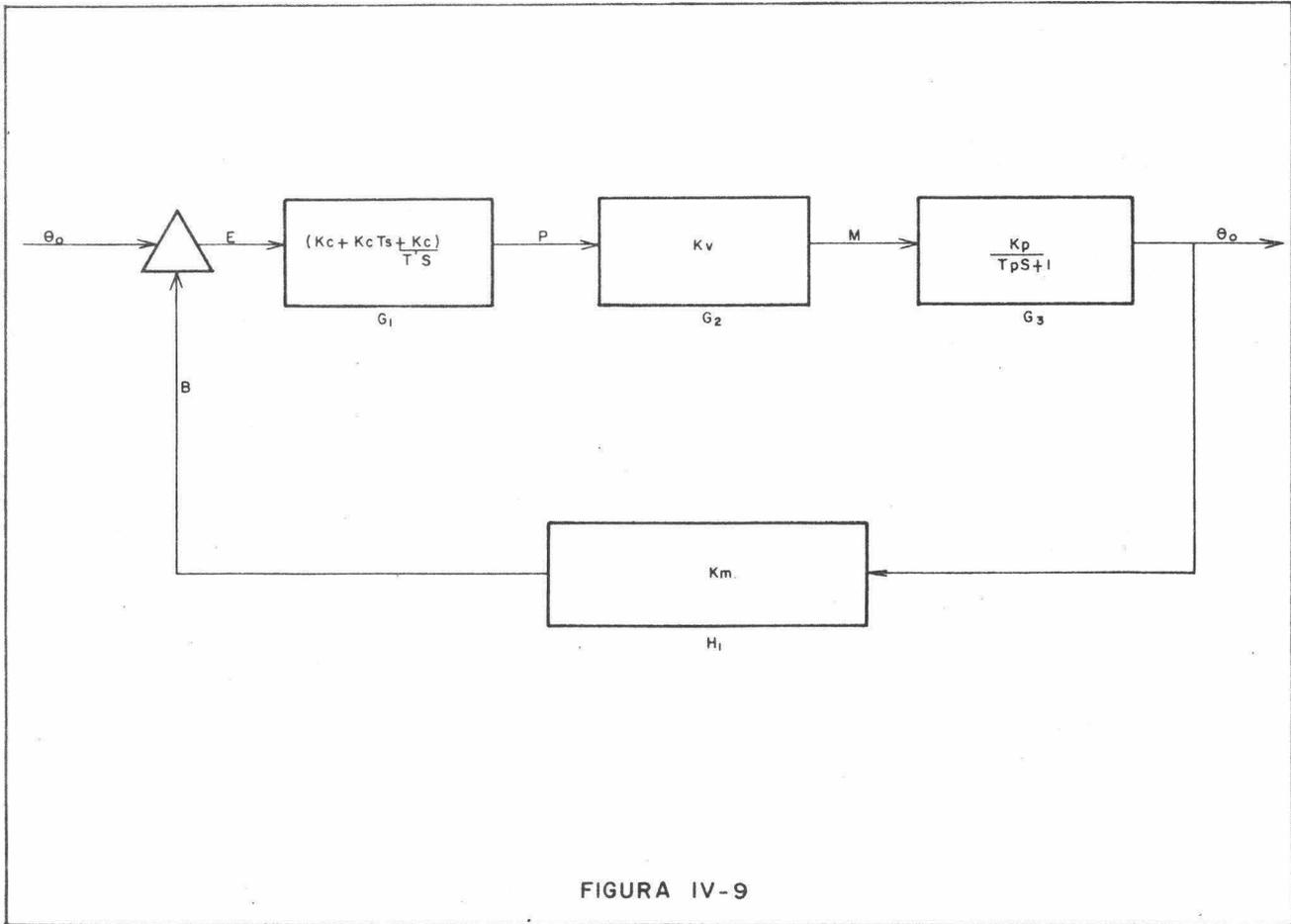
$$\frac{\theta_o}{\theta_i} = \frac{G_1 G_2 G_3}{1 + G_1 G_2 G_3 H_1} \quad \text{Sustituyendo sus respectivos valores:}$$

$$\frac{\theta_o}{\theta_i} = \frac{\left(K_c + K_c T_d S + K_c / T_i S \right) (K_v) \left(\frac{K_p}{(T_p S + 1)} \right)}{1 + \left(K_c T_d S + K_c / T_i S \right) (K_v) \left(\frac{K_p}{(T_p S + 1)} \right) (K_m)}$$

Quedando en su forma más simple:

$$\frac{\theta_o}{\theta_i} = \frac{K_p K_v K_c}{(T_p S + 1) + K_p K_v K_m K_c} \quad \text{A partir del denominador se -}$$

puede obtener la ecuación característica de la función, o sea:



$$(T_p S + 1) + K_p K_v K_m K_c = 0 \quad (15)$$

La ecuación (15) nos da el operador de transferencia entre los valores real y deseado de la variable controlada en condiciones de carga constante.

Respuesta Armónica.

Las perturbaciones con las que tiene que tratar un sistema de control contienen generalmente funciones armónicas. A continuación estudiaremos la respuesta del sistema a perturbaciones de este tipo.

Una función armónica del tiempo se puede representar por $\sin wt$ ó por el $\cos wt$, donde $w/2\pi$ es la frecuencia de la oscilación medida en ciclos/tiempo. Denominaremos a w , medida en radianes por tiempo, frecuencia circular. Si θ_i se considera igual a $\sin wt$, será cero para $t = 0$, mientras que si θ_i se hace igual a $\cos wt$ su valor para $t = 0$, es la unidad. Sustituyendo θ_i por $\sin wt$ en la ecuación (5) y haciendo la hipótesis de que $\theta_i = \theta_o = 0$ para $t = 0$, obtenemos θ_o para $t = 0$ como:

$$\theta_o = \frac{1}{(1 + TS)} \sin wt \quad (16)$$

Si consideramos que:

$\theta_o = A \sin (wt - \psi)$ y sustituimos este valor en la ecuación (16) e igualando los coeficientes de $\sin wt$ y $\cos wt$ obtenemos:

$$T_g \Psi = wt$$

$$Y \quad A = \frac{1}{(1 + w^2 T^2)^{1/2}} \quad (17) \quad \text{La integral particular}$$

De la solución está dada por:

$$\theta_o = A \sin (wt - \Psi) \quad (18) \quad \text{Donde } A \text{ y } \Psi \text{ son conocidos -}$$

en términos de wt .

La solución general sería:

$$\theta_o = R e^{-\frac{t}{T}}$$

Por lo tanto, $\theta_o = A \sin (wt - \Psi) + R e^{-\frac{t}{T}}$ inicialmente, -

en $t = 0$ suponemos que $\theta_o = \theta_i$ así:

$$0 = - A \sin \Psi + R$$

$$R = \frac{w T}{1 + w^2 T^2} \quad (19)$$

Así pues, la respuesta completa está dada por:

$$\theta_o = A \sin (wt - \Psi) + R e^{-\frac{t}{T}} \quad (20)$$

Se observa en la ecuación (20) la solución general o respuesta transitoria que cae exponencialmente a cero conforme aumenta el tiempo. Lo importante en el análisis armónico es la respuesta en el estado estacionario que permanece después que el período transitorio ha desaparecido, como puede observarse en la ecuación (19), ó solamente la integral particular como se -

da en la ecuación (16)

Graficando la señal sinusoidal como estímulo junto con la parte estacionaria de la respuesta en función de t , como se observa en la figura IV-10.

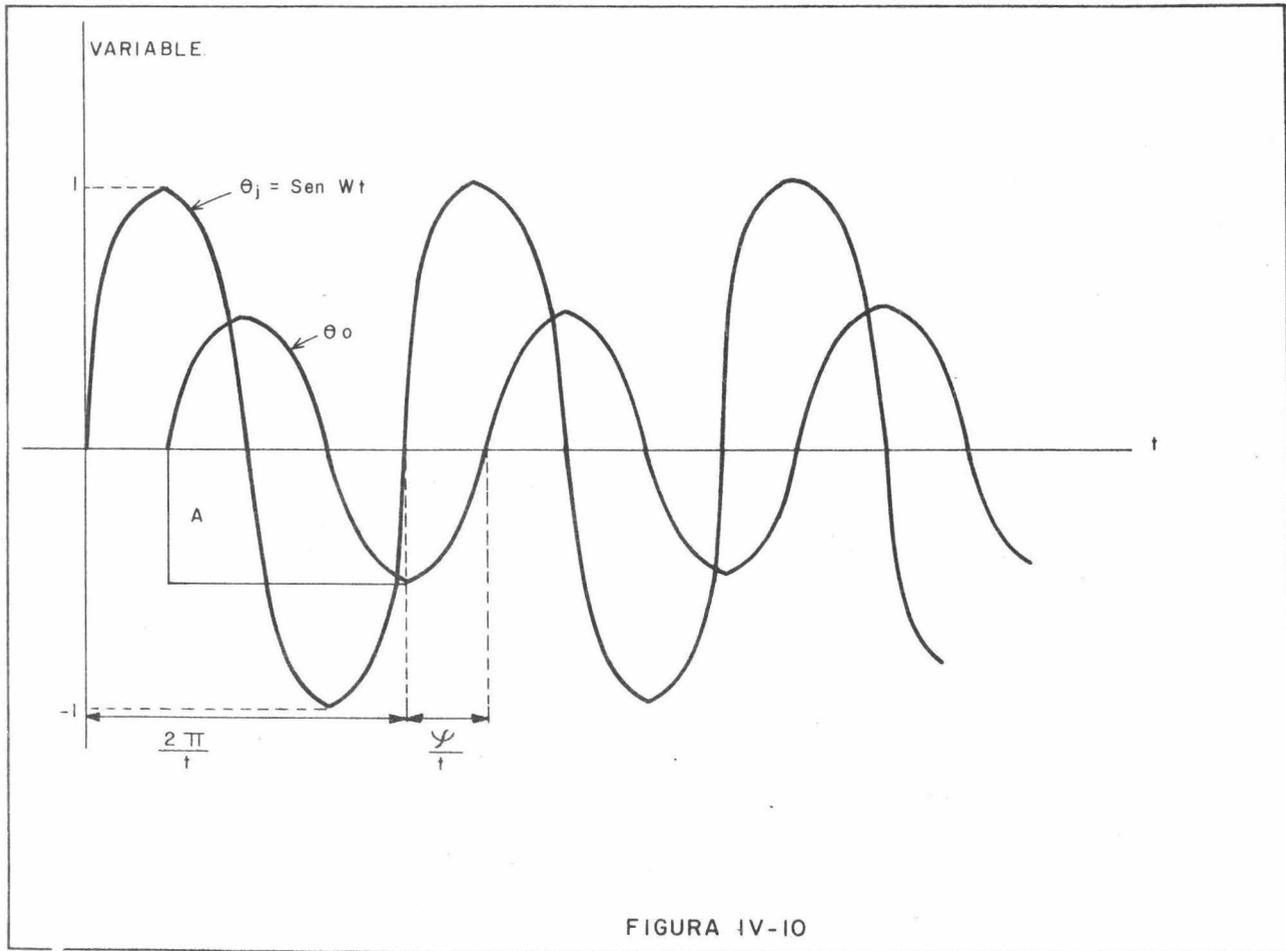
En la ecuación (17) y en la figura IV-10, se ve que la amplitud de la respuesta es más pequeña que la unidad, que es la amplitud del estímulo. También la respuesta se retrasa con respecto al estímulo un ángulo Ψ ó un tiempo $\frac{\Psi}{w}$.

La respuesta no quedaría completa si no se considera que esa respuesta típica de un sistema estable a una perturbación externa es una oscilación en la cual la amplitud se reduce con el tiempo, de modo que la variable se estabiliza a un cierto punto. Entonces se habla de una respuesta armónica amortiguada y para ello se considera: El factor $e^{-\alpha t}$, que agragado a la ecuación (5) quedaría:

$\theta_i = e^{-\alpha t} \text{ Sen } wt$ donde α es llamado "factor de amortiguamiento", posee dimensiones de $(\text{tiempo})^{-1}$, que sería lo mismo que las pulsaciones w .

Entonces, es necesario agragar ese factor a todas las ecuaciones anteriores, quedando finalmente:

$$\theta_o = Ae^{-\alpha t} \text{ Sen } (wt - \Psi) \quad (21)$$



Donde:

$$A = \frac{1}{\left[(1 + T)^2 + w^2 T^2 \right]^{1/2}} \quad (22)$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{wt}{(1 + \alpha T)} \quad (23)$$

Graficando las ecuaciones (21), (22) y (23) nos queda la figura IV-11, siendo ésta casi igual a la figura IV-10.

Estabilidad.

Sobre la estabilidad del sistema de control automático se tiene:

Si el exponente de la ecuación que describe al sistema, ecuación (21), fuera positivo, ese término aumentaría con el tiempo y la solución sería:

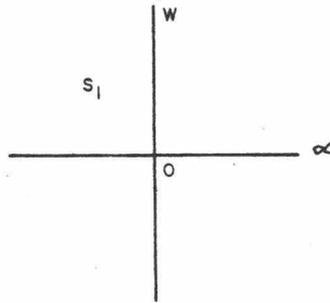
$$\theta_o(t) \rightarrow \infty ; \quad t \rightarrow \infty$$

En este caso la respuesta sería INESTABLE. Físicamente, significa que la señal de respuesta continuaría aumentando en magnitud hasta un valor donde la ecuación original sería grande.

Una respuesta ESTABLE sería lo inverso a lo anterior. Siendo -- pues, la inestabilidad ó estabilidad una característica del --- sistema.

La magnitud compleja $(\alpha + jw)$ es de tal importancia que se le da un símbolo especial S. Tiene dimensiones de un (tiempo)⁻¹ y

puede denominarse como pulsación compleja, representándola en una gráfica quedaría:



Una senoide normal amortiguada se puede representar por un -- punto S_1 en el segundo cuadrante.

Si se encuentra el valor de S de la ecuación (22) haciendo:

$T (\alpha + jw) = A = \infty$ éste representaría el modo natural del retardo exponencial. Tal condición es satisfecha para $\alpha = \frac{1}{T}$, ---- $w = 0$, es decir, $S = -\frac{1}{T}$, ésto es lo mismo que la raíz de la -- ecuación (15).

Para el presente estudio, la figura IV-12, muestra la posición - del único polo del retardo exponencial.

Los contornos del módulo en las ecuaciones (22) y (23) son ---- círculos concéntricos centrados en el polo $-\frac{1}{T}$ y los contornos de fase son líneas rectas que radian desde el polo. Así, para -- ésta simple función de transferencia, la representación de los -

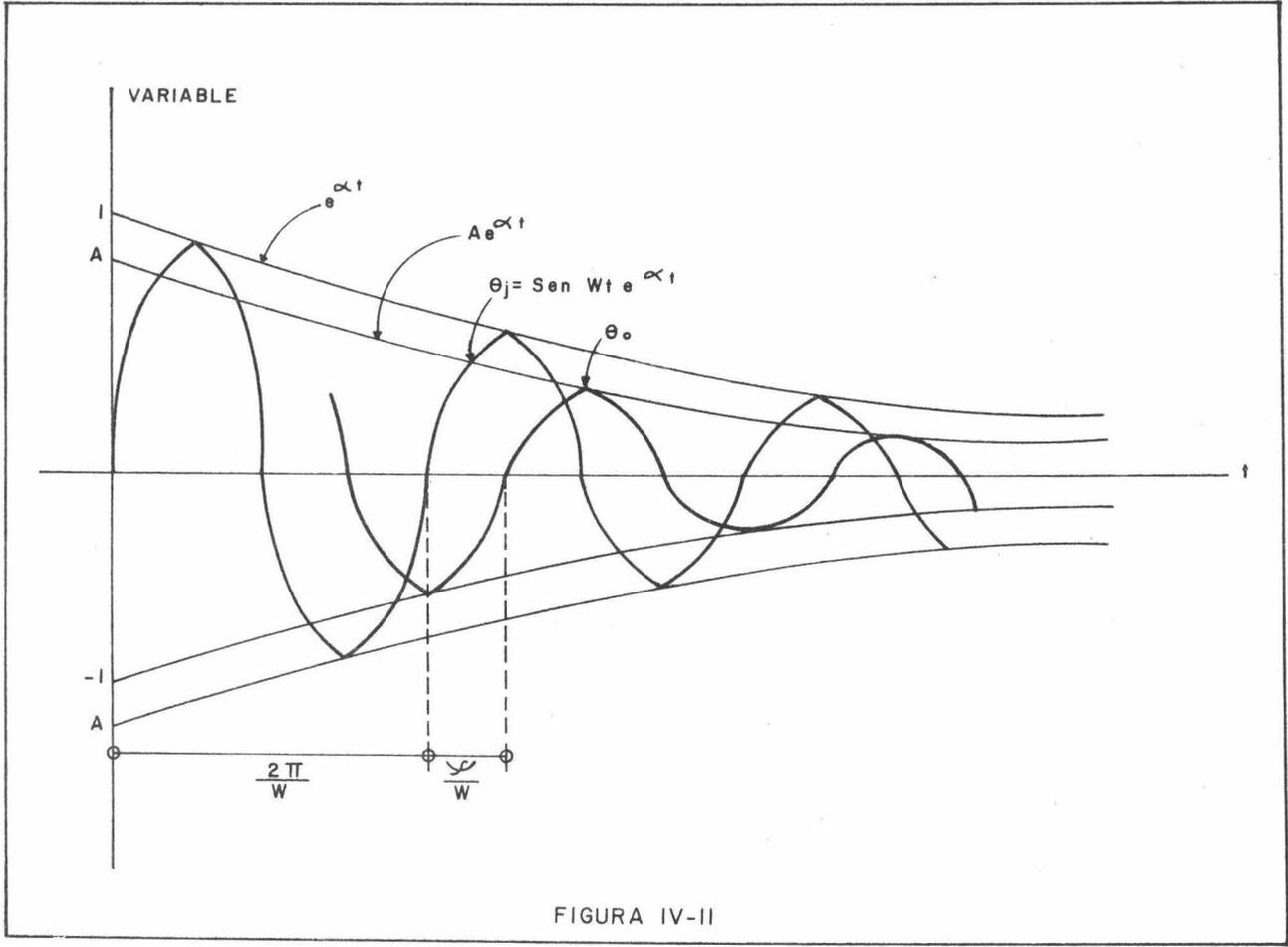


FIGURA IV-II

contornos en la proximidad de un polo se continúa a través del plano, según la figura IV-13.

La función de transferencia del proceso G_3 puede considerarse -- como el retardo exponencial y la función de transferencia del -- controlador G_1 es de tipo proporcional más integral, más deriva- tivo. Entonces podemos escribir:

$$\frac{\theta_o}{\theta_i} = \frac{K_p K_v K_c}{(TS + 1) + K_p K_v K_c K_m}$$

Si, $K = \frac{K_p K_v K_c}{T}$; $F(s) = \frac{1}{(s + 1/T)}$ Ahora podemos dibujar

el esquema polo-cero para la trayectoria directa, es decir, para $F(s)$. Hay un polo finito en $S = \frac{1}{T}$ y un cero en el infinito. El polo se muestra en la figura IV-12. El lugar geométrico de las raíces, o sea, el contorno de fase de 180° , tiene solamente una rama, puesto que $F(s)$ es de primer orden. De la figura IV-14, -- se ve que empieza en el polo para seguir hacia la izquierda en -- línea recta por el eje real hacia el cero en el infinito. Los -- contornos del módulo son círculos centrados en el polo. El ---- círculo debe tener por módulo $\frac{1}{K}$, ó sea $\frac{T}{K_p K_v K_c}$. Si el radio --

del círculo es r , tenemos:

$$\frac{1}{K_p K_v K_c} = \frac{1}{r} \quad \text{ó} \quad r = \frac{K_p K_v K_c}{T} \quad \text{el círculo dado por esta ecua-}$$

ción se indica en la figura IV-14, se ve que el lugar geométrico de las raíces se corta en un sólo punto en el eje real negativo. Este punto es el polo del ciclo cerrado, dado por:

$$S = \left(\frac{1 + \frac{K_P K_V K_C}{T}}{T} \right) \quad \text{que demuestra que la respuesta del --}$$

ciclo no es oscilatoria.

Lo anterior lo podemos sintetizar en los siguientes puntos:

1.- Factor característico del denominador de la función igualada a cero:

$$\left(S + \frac{1}{T} \right)$$

2.- Raíz característica:

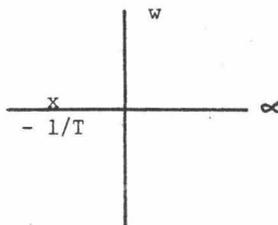
$$S = - \frac{1}{T}$$

3.- Contribución algebraica de la ecuación de respuesta:

$$\text{Re}^{-\frac{t}{T}}$$

4.- Estabilidad: si $-\frac{1}{T} \equiv 0$ es estable

5.- Localización de la raíz en el plano s:



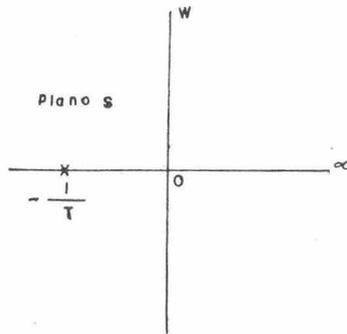


FIGURA IV-12

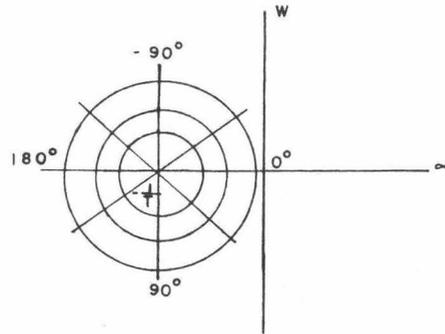


FIGURA IV-13

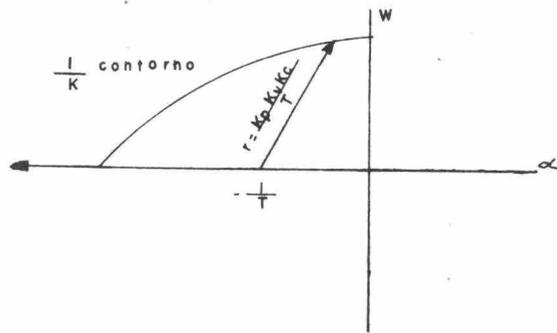
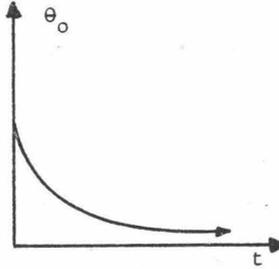


FIGURA IV-14

6.- Forma de contribución a la curva de respuesta:



En conclusión para este capítulo, cabe decir que todo lo anterior lleva la finalidad de saber como se detecta la temperatura, como se registra y como interpretar ese registro de acuerdo a las condiciones fijas al proceso, y saber si ese registro es realmente lo que esperamos, si no, saber con que elementos contamos para manipular y llevar el ajuste a las condiciones del proceso. Si todo ello no se ajusta a nuestro proceso hay que seleccionar entonces otro medio de control automático. Así podemos sujetar nuestro control automático a lo que el proceso necesite para su mejor funcionamiento en todos los aspectos.

V.- COSTRO DEL NUEVO SISTEMA

V.- COSTO DEL NUEVO SISTEMA:

Para obtener el costo del nuevo sistema de control automático se recurre al inciso 3 del capítulo III:

A) Materiales (materia prima):

- Acarreo de materia prima	\$ 35,528.49
----------------------------	--------------

B) Mano de obra directa:

- Acarreo de materia prima	\$ 7,677.00
----------------------------	-------------

- Mantenimiento	5,862.30
-----------------	----------

- Producción. Aquí vendría la sustitución de las cuatro personas por un mecánico, con \$ 80.00 diarios, más un 20 % en prestaciones.	<u>2,880.00</u>
--	-----------------

Total Mensual:.....\$	16,419.30
-----------------------	-----------

C) Costos de Fabricación:

- Acarreo de materia prima	\$ 28,060.89
----------------------------	--------------

- Mantenimiento	10,769.09
-----------------	-----------

- Producción	<u>68,884.45</u>
--------------	------------------

Total Mensual:.....\$	107,714.43
-----------------------	------------

Costo total de producción con el nuevo sistema automático:

35,528.49 + 16,419.30 + 107,714.43 = \$ 159,662.22 Mensual.

Por lo tanto, el costo de operación por tonelada de producto:

$$\frac{159,662.22}{3,284.67} = \$ 48.60$$

Entonces, comparando al sistema actual con el nuevo sistema -
tenemos que:

El costo de operación por
tonelada de producto con
el nuevo sistema:

\$ 48.60

El costo de operación por
tonelada de producto con
el sistema actual:

\$ 57.64



QUIMICA

VI.- COMPARACION DE COSTO POR EL SISTEMA DE FLUJO DE
EFECTIVO DESCONTADO.

VI.- COMPARACION DE COSTO POR EL SISTEMA DE FLUJO DE EFECTIVO
DESCONTADO.

La comparación de costo por el sistema de flujo de efectivo --
descontado se hace en base a dos alternativas:

ALTERNATIVA A:

Costo inicial:

Instrumentación	\$ 60,756.00
Una compresora	50,000.00
Instalación	<u>11,075.60</u>
	\$ 121,831.60

Costo anual:

La depreciación, se calcula por el método proporcional, uniforme o de línea recta. Este método es el más empleado en este tipo de calculo por su sencillez, distribuyendo el costo inicial uniformemente sobre el demérito de su valor, entonces:

$$D = \frac{F - J}{t}$$

Sustituyendo sus respectivos valores tenemos:

$$D = \frac{121,831.60 - 1,218.31}{5} = \$ 24,122.66$$

Esto significa, que el equipo cueste \$ 121,831.60 y tiene una

vida útil de 5 años, estimándose un valor de recuperación de - \$ 1,218.31, el cargo anual a gastos por depreciación proporcional, uniforme o de línea recta a los años sería de \$24,122.66.

Por lo tanto:

Depreciación	\$ 24,122.66
Mantenimiento	6,000.00
Un Mecánico	<u>34,560.00</u>
	\$ 64,682.66

Se considera que tanto el costo de personal como el de mantenimiento que se le da al equipo, nos aumenta año con año un 10 %, por lo que la línea del tiempo quedaría:

121,831.60	64,682.66	68,738.66	73,200.26	78,108.02	83,505.98
/	/	/	/	/	/
0	1	2	3	4	5

La selección de la tasa adecuada es una prueba difícil, sin embargo, cualquiera que sea la tasa seleccionada, es casi seguro que será bastante más alta que una tasa de interés; esto es, la tasa que se usa en los préstamos (digamos, del 4 al 7 por ciento después del impuesto).

En base a esto se escoge una tasa o interés básico del 20 %, - construyéndose así la tabla 3 en el apéndice A. Por lo que esta alternativa tiene un valor presente ó actual de \$340,830.60.

ALTERNATIVA B:

Costo inicial:	No se tiene	
Costo anual:	Mantenimiento	\$ 70,347.60
	Mano de obra	<u>120,960.00</u>
		\$ 191,307.60

En esta alternativa como en la anterior, el costo de personal como el de mantenimiento nos aumenta año con año un 10 %, por lo que la línea del tiempo, para esta alternativa quedaría:

0	210,438.36	231,482.2	254,630.3	280,093.3	308,102.6
/	/	/	/	/	/
0	1	2	3	4	5

Se considera la misma tasa de interés, o sea 20 %. Construyéndose así la tabla 4 del apéndice A. Por lo que esta alternativa tiene un valor presente o actual de: \$ 741,674.28.

Tanto en la tabla 3 como en la tabla 4 se ha empleado para el cálculo del factor de descuento la fórmula siguiente:

$$d = S_1 \frac{1}{(1+i)^n}$$

al segundo término de esta

ecuación se le conoce como el factor del trabajo presente, -- consultándose en las tablas financieras (12).

CONCLUSION: La alternativa A, es más económica que la alternativa B, en el tiempo presente, o sea:

Valor actual para la alternativa A: \$ 340,830.60

Valor actual para la alternativa B: \$ 741,674.28

VII.- CONCLUSIONES

VII.- CONCLUSIONES:

- 1.- El uso del control automático permitirá mantener la temperatura adecuada para nuestro proceso, lo cual nos proporcionará un producto con las características de humedad requeridas.
- 2.- Económicamente, el nuevo sistema de control automático es más económico, que el sistema actual. Tanto en el costo de operación como el costo de mano de obra.
- 3.- El equipo recomendable debe tener las siguientes características:
 - a) Un registrador controlador de temperatura, que la convierte en una cantidad eléctrica (actuación termopar).- Control neumático de tres formas: Proporcional más integral, más derivativo. Carta circular con una velocidad de una revolución por hora.
 - b) Detector de temperatura.- Un termopar que tenga un rango de temperatura de 0 a 250°C. La construcción del mismo sería cobre-constantan.
 - c) Válvula de control.- Una válvula motorizada de diafragma de 1/2 pulgada de acero, con una presión de alimentación de 1.4 Kg/C_m² y una presión de salida de 0.2 a 1.0 Kg/Cm², que actuará en el diafragma de la válvula.

4.- El equipo de control que reúne las características anteriores podemos mencionar al de la Compañía FOXBORO, S.A. catalogándolo como el modelo 40R-C55, según su boletín - 570.

VIII.- BIBLIOGRAFIA

1. Control Automático de Temperatura
Tesis Profesional 1956
Francisco Pallares
Universidad de Puebla.
2. Control Automático
C. R. Webb
Ediciones Urmo 1968, Bilbao, España.
3. Boletines Industriales:
Honeywell Brown Instruments
Foxboro Instruments System
4. Estudio de un Proyecto de una Fábrica de Yeso en
Guadalajara, Jal.
Tesis Profesional 1952
Valencia Ureña Camilo
U. A. G.
5. Estudio de una Fábrica de Yeso en Morelos
Tesis Profesional 1952
Ludlow Landero José
U. N. A. M.
6. Chemical Engineers' Handbook
John H. Perry
Ed. McGraw-Hill, Fourth edition.
7. Automatic Process Control for Chemical Engineers
Norman H. Ceaglske
Ed. Wiley & Sons, Inc. 1956.
8. Automatic Process Control
Donald P. Eckman.
9. Industrial Control Instruments
B. Chester Delahooke
Delmar Publishers, Inc. 1956
10. Introduction to Chemical Process Control
Daniel D. Perlmutter
John Wiley & Sons, Inc. 1965.

11. Contabilidad en la Administración de Empresas
 Texto y Casos
 Robert N. Anthony, D.C.S.
 Primera Ed. UTEHA. 1969.
12. Financial Analysis of Investment Alternativas
 Raymond R. Mayer
 Allyn & Bacon, Inc. Boston 1966.
13. Tablas Financieras, Actuariales y de Logaritmos con Tasa
 de interés.
 Act. Benjamín de la Cueva G.
14. Engineering Data Book
 By Natural Gas Processors Suppliers Association
 Ed. eighth 1967.
15. Proces Instrumentation Manual, I.
 Published by Hydrocarbon Processing, 1968.

A P E N D I C E A

TABLA No. 1

Tipo de Tanque	Fórmula para el cálculo del volúmen	Factor de corrección ó volúmen parcial de altura	Volúmen total de líquido contenido
VERTICAL	$v = r^2 h$	-	$V = r^2 h$
HORIZONTAL	$v = \frac{1D^2}{4}$	$H = \frac{h}{D} \cdot v$	$V = v \cdot H_1$
ELIPTICO	$v = \frac{K_1 K_2}{6} D^3$	$H = \frac{h}{D} \cdot v$	$V = v \cdot H_1$

TABLA No. 2

Días	Tanque de almacenamiento	Tanque de alimentación. Planta 1 Lts.	Tanque de alimentación. Planta 2 Lts.	PRODUCCION	
				Yeso A Ton.	Yeso B Ton.
1	15,654	4,239	4,899.6	89.000	20.390
2	14,337.4	3,667.5	4,797	63.500	30.920
3	16,531.9	6,322	8,735.6	106.375	9.930
4	16,531.9	4,292.4	5,761.5	108.250	3.900
5	14,191.1	3,979.5	5,511.4	55.050	60.130

TABLA No. 3

Años	Pago Anual \$ A	Factor de descuento, 20% \$ B	Valor actual \$ AxB
0	121,831.60	1	121,831.60
1	64,682.66	0.833	53,880.65
2	68,738.66	0.694	47,704.63
3	73,200.26	0.578	42,279.75
4	78,108.02	0.482	37,648.07
5	83,505.98	0.401	37,485.90

P = 340,830.60

TABLA No. 4

Años	Pago Anual \$ A	Factor de descuento, 20% \$ B	Valor actual \$ AxB
0	0	1	0
1	210,438.36	0.833	175,295.15
2	231,482.20	0.694	160,648.65
3	254,630.34	0.578	147,176.34
4	280,093.30	0.482	135,005.00
5	308,102.59	0.401	123,549.14

P = 741,674.28

TABLA No. 5

Días	Producción de Yeso A Ton/día	Producción de Yeso B Ton/día	Total de Producción Ton/día
1	89.000	20.390	109.39
2	63,500	30,920	94.42
3	106.375	9.930	116.31
4	108.250	3.900	112.15
5	55.050	60.130	115.18
Promedio:	84,435	25.054	109.489

A P E N D I C E B

1.- D A T O S. (6).

(a) $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ cristal calor de formación $\Delta H = - 479.33 \frac{\text{Kcal}}{\text{mole}}$
(sólido) a 25°C y 1 atm.

(b) $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ cristal calor de formación $\Delta H = - 376.13 \frac{\text{Kcal}}{\text{mole}}$
(sólido) a 25°C y 1 atm.

(c) H_2O líquido calor de formación $\Delta H = - 68.31 \frac{\text{Kcal}}{\text{mole}}$
a 25°C y 1 atm.

CALCULO DEL ΔH DE REACCION IDEAL:

$$\Delta H_{\text{reacción}} = \sum \Delta H_{\text{productos}} - \sum \Delta H_{\text{reactivos}}$$

Sustituyendo datos nos quedaría:

$$\Delta H_{\text{reacción ideal}} = 69.05 \text{ Kcal/mole}$$

2.- PARA EL YESO A.

En la gráfica III.1, encontramos para la molécula de:



$$\Delta H_{\text{formación}} = - 370 \text{ Kcal/mole.}$$

$$\Delta H_{\text{reacción para el yeso A.}} = \sum \Delta H_{\text{Productos}} - \sum \Delta H_{\text{reactivos}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \left[(-370 \quad 1.597 \quad \{-68.31\}) - (-376.13) \right] \\
 &= -102.96 \quad \text{Kcal/mole} \\
 &= -673.2 \quad \text{Kcal/Ton}
 \end{aligned}$$

3.- PARA EL YESO B.

En la gráfica III.1, encontramos para la molécula de:



$$\Delta H_{\text{formación}} = -365 \quad \text{Kcal/mole}$$

$$\Delta H_{\text{reacción para el yeso B.}} = \sum \Delta H_{\text{productos}} - \sum \Delta H_{\text{reactivos}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \left[(-365 \quad 1.677 \quad \{-68.31\}) - (-376.13) \right] \\
 &= -103.42 \quad \text{Kcal/mole} \\
 &= -677 \quad \text{Kcal/Ton}
 \end{aligned}$$

4.- CARACTERISTICAS DEL PETROLEO.

- Poder calorífico, 9,702 Kcal/Kg.
- Peso específico a 20/4°C, 0.991