



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO
DINÁMICO EN UNA COLUMNA EMPACADA
PARA EL PROCESO DE ABSORCIÓN DE CO₂ EN
MEA: PROPUESTA DE PROTOCOLO
EXPERIMENTAL PARA LA MATERIA DE
“LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA IV”**

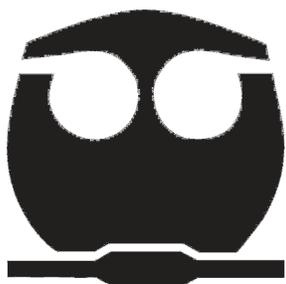
TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

EDGAR MANUEL OBREGÓN ROJAS



MÉXICO, D.F.

2012



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.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: Ricardo Pérez Camacho**

VOCAL: **Profesor: Ángel Enrique Chávez Castellanos**

SECRETARIO: **Profesor: José Fernando Barragán Aroche**

1er. SUPLENTE: **Profesor: Luis Medina Torres**

2° SUPLENTE: **Profesor: Néstor Noé López Castillo**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Laboratorio de Ingeniería Química

Facultad de Química

ASESOR DEL TEMA:

Dr. José Fernando Barragán Aroche

SUSTENTANTE:

Edgar Manuel Obregón Rojas

A mis padres por sus consejos y apoyo en todo lo que he decidido hacer y a mi hermano porque siempre logra hacerme reír sin importar lo ocupado o estresado que esté.

A Gabriel, Rafa, Chava, Blanca, Chamu y MariOH por ser mis compañeros de batalla durante la carrera y por todos esos momentos que compartieron conmigo y, por supuesto, los que compartiremos en el futuro.

A la Facultad de Química y a la UNAM por que esta fue una etapa muy importante en mi vida y me llena de orgullo y satisfacción haberla pasado aquí, la mejor universidad de México.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1.- MARCO TEÓRICO	2
1.1.- ABSORCIÓN FÍSICA	2
1.2.- DISEÑO DE COLUMNAS DE ABSORCIÓN FÍSICA EMPACADAS	10
1.3.- ABSORCIÓN REACTIVA.....	26
1.4.- DINÁMICA DE PROCESOS.....	37
CAPITULO 2.- ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	59
2.1.- DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.....	59
2.2.- ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	62
CAPITULO 3.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES	74
3.1.- RESUMEN DE RESULTADOS.....	80
3.2.- CONCLUSIONES.....	104
CAPITULO 4.- PROPUESTA DE PROTOCOLO EXPERIMENTAL	112
4.1.- ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	112
4.2.- PROTOCOLO EXPERIMENTAL	114
ANEXO 1.- DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE LA COLUMNA EMPACADA PIGNAT	128

ANEXO 2.- INSTRUCCIONES DE USO DE SOFTWARE Y HADWARE DE CONTROL DE INSTRUMENTOS PARA LA VISUALIZACIÓN DE VARIABLES EN TIEMPO REAL	129
ANEXO 3.- INSTRUCCIONES DE USO DE LA BOMBA PERISTÁLTICA	133
ANEXO 4.- COLECCIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y AJUSTE DE MODELOS	135
ANEXO 5.- RESPUESTA A LAS PERTURBACIONES EN EL FLUJO DE ALIMENTACIÓN DE SOLUCIÓN DE MEA (Programación)	176
BIBLIOGRAFÍA	189
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	192

INTRODUCCIÓN

Dentro del programa de la materia "Laboratorio de Ingeniería Química IV" están incluidos temas relacionados con el estudio de la dinámica y el control de los procesos; los resultados que se obtienen con los guiones que se ocupan actualmente no son del todo satisfactorios. Se puede decir que no se ha logrado alcanzar el objetivo planteado de enseñanza experimental con estos guiones en cuanto a dinámica y control de procesos se refiere. Con los nuevos módulos de medición recientemente adquiridos por el LIQ es posible obtener datos de los equipos en los que están instalados de una manera más eficiente. Con la ayuda de estos es más fácil realizar un análisis de sensibilidad que permita identificar las variables que tienen más efecto (mayor ganancia) sobre el proceso. Para lograr lo anteriormente mencionado, además del uso de los nuevos módulos de medición instalados en la columna empacada PIGNAT, su correspondiente software y la columna misma, será necesario el apoyo de otras herramientas computacionales. El objetivo principal es proponer modelos dinámicos empíricos que describan el comportamiento registrado por los sensores instalados en la columna, usando el método de "curva de respuesta" a partir de un análisis de sensibilidad, que consiste en identificar el efecto de la manipulación de las variables en la Columna Empacada PIGNAT para el procesos de absorción de CO₂ en MEA, con el fin de proponer un protocolo experimental viable para la materia LIQ IV relacionado con el tema de Dinámica y Control de Procesos.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 Absorción Física

La absorción es una operación de transferencia de masa la cual consiste en separar uno o más componentes de una mezcla gaseosa utilizando un absorbente líquido. La absorción sólo puede ocurrir por difusión^[1] en el líquido desde la interfase. Es por eso que el fenómeno de difusión es de gran importancia en el proceso de absorción. La difusión se da cuando una solución no es completamente uniforme con respecto a la concentración de sus componentes, esto provoca que las sustancias se muevan de un punto de concentración elevada a otro de baja concentración. Así, la rapidez con la que un soluto se mueve dependerá del gradiente de concentración. La difusividad, D_{AB} , de un componente A en una solución B se define como la relación de su flux y su gradiente de concentración, esto fue definido por Fick en 1885^[9] mediante la siguiente ecuación:

$$J_{Ax} = -D_{AB} \frac{dC_A}{dx} \dots \dots \dots \text{ec. 1.1.1}$$

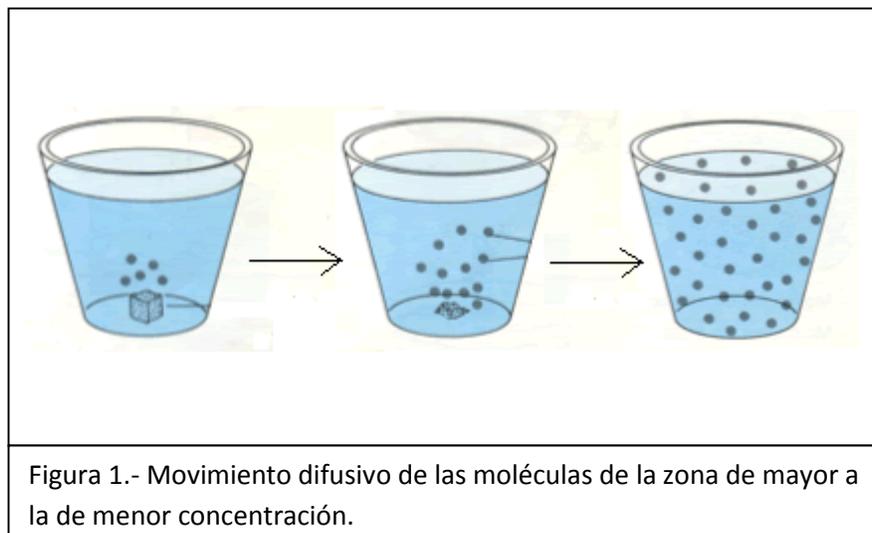
Esta ecuación también es conocida como primera ley de Fick, en donde:

“ J_{Ax} ” es el flux de A en dirección x expresado en $[\text{mol}/\text{cm}^2 \text{ h}]$.

“ D_{AB} ” es el coeficiente de difusión expresado en $[\text{cm}^2/\text{h}]$.

" $\frac{dC_A}{dx}$ " representa el gradiente de concentración en dirección x expresado en $[\text{mol}/\text{cm}^3 \cdot \text{cm}]$.

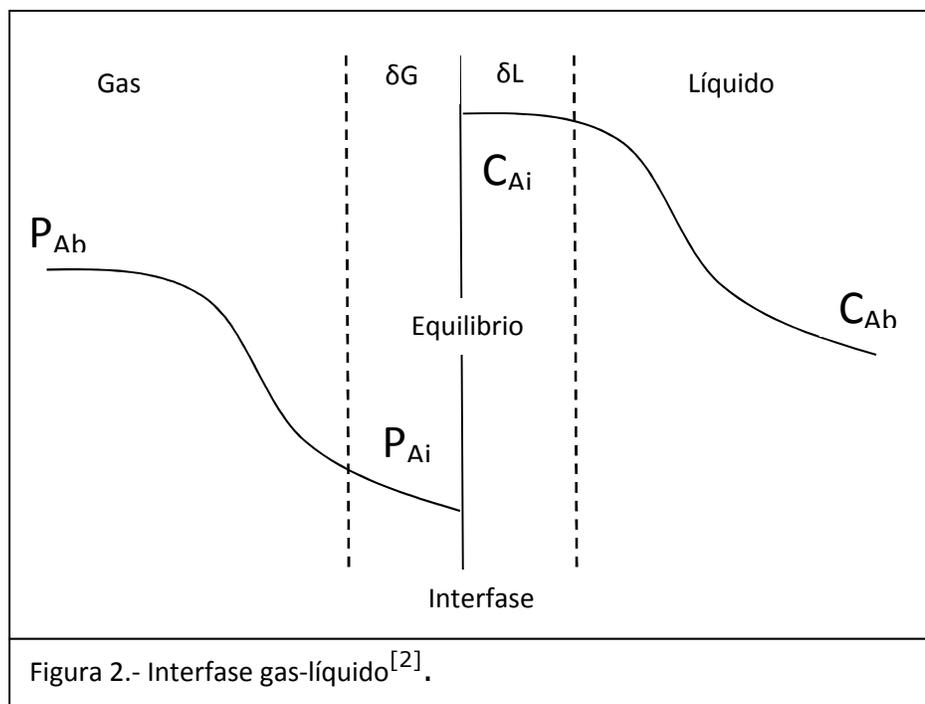
El signo negativo presente en la ecuación indica que la difusión ocurre en el sentido del decremento en concentración. El coeficiente de difusión es una característica propia del componente y de su entorno (temperatura, presión, concentración, viscosidad, conductividad térmica y otras propiedades del medio).



En una columna de absorción empacada, así como en la mayoría de las operaciones de transferencia de masa, existe un contacto directo entre dos fases inmiscibles. Cuando estas dos fases, que no están en equilibrio, se ponen en contacto, el sistema trata de alcanzar el equilibrio mediante un movimiento difusivo de los componentes, desde la fase en la que el potencial químico (μ) es mayor hacia la fase en la que el potencial químico es menor.

El potencial químico se puede definir como la tendencia de un componente a “escapar” de una determinada fase. Como ya se mencionó, en las columnas de absorción se pone en contacto una fase gaseosa con una fase líquida, con el fin de eliminar o separar un componente o varios de la fase gaseosa transfiriéndolos a la fase líquida gracias a una diferencia de potencial químico. Dichos componentes que se desea separar son llamados “soluto”, mientras que la fase líquida en la cual son absorbidos es llamada “absorbente”.

Lo que ocurre en las columnas de absorción es una transferencia de masa a través de una interfase^[2]. Considere el siguiente esquema propuesto por Withman en 1923^[2]:



Un soluto A se transfiere desde el seno del gas hacia la interfase, en esa zona ocurrirá un fenómeno de dilución justo en la interfase del lado de la fase líquida. De ahí se difundirá hacia el seno de esta. La presión parcial del soluto en el seno de la fase gas es P_{Ab} expresada en [atm] o cualquier otra unidad de presión, la correspondiente en la interfase del lado del gas es P_{Ai} también expresada en las mismas unidades. La concentración del soluto A en la interfase del lado del líquido será C_{Ai} y en el seno de este será C_{Ab} ambas expresadas en [mol/cm³]. Debido a que la interfase es muy delgada, se puede considerar que no hay resistencia a la transferencia de masa y está en estado estacionario. El flux de A que arriba a la interfase del lado del gas es N_{AiG} expresado en [mol/cm²*h] y está definido por la siguiente ecuación:

$$N_{AiG} = k_G (P_{Ab} - P_{Ai}) \dots \dots \dots \text{ec. 1.1.2}$$

k_G es el coeficiente individual de transferencia de masa del lado del gas, definido como: moles transferidos de A/(tiempo)(área de la interfase)(Δp unidades de concentración), expresado en [mol/h*cm²*atm].

El flux de A que se transfiere desde la interfase hacia el seno del líquido es N_{AiL} , el cual tiene las mismas unidades que N_{AiG} , y está dado por:

$$N_{AiL} = k_L (C_{Ai} - C_{Ab}) \dots \dots \dots \text{ec. 1.1.3}$$

k_L es el coeficiente individual de transferencia de masa del lado del líquido, definido como: moles transferidos de A/(tiempo)(área de la interfase)(Δc unidades de concentración), expresado en [mol/h*cm²*(mol/cm³)].

Aplicando la ecuación de Henry a las condiciones de interfase tenemos:

$$P_{Ai} = H C_{Ai} \dots \dots \dots \text{ec. 1.1.4}$$

En donde H es la constante de Henry expresada en [cm³*atm/mol]. Es importante mencionar que la ley de Henry se ocupa cuando el soluto en cuestión se encuentra por encima de su punto crítico, es decir, aquellas condiciones de temperatura y presión por encima de las cuales no se puede condensar un gas. En caso de que esto no se cumpla se emplea la ley equivalente para vapores conocida como ley de Raoult.

Sustituyendo la (ec. 1.1.4) en (ec. 1.1.2):

$$N_{AiG} = k_G (P_{Ab} - HC_{Ai}) \dots \dots \dots \text{ec. 1.1.5}$$

Como se supuso estado estacionario, se tiene que:

$$N_{AiG} = N_{AiL} = N_{Ai} \dots \dots \dots \text{ec. 1.1.6}$$

En general se puede decir que:

$$N_{Ai} = k_G (P_{Ab} - HC_{Ai}) = k_L (C_{Ai} - C_{Ab}) \dots \dots \dots \text{ec. 1.1.7}$$

La (ec. 1.1.7) nos permite calcular de una manera indirecta las concentraciones en la interfase a partir de la llamada línea de unión:

$$-\frac{k_L}{k_G} = \frac{P_{Ab} - HC_{Ai}}{C_{Ab} - C_{Ai}} \dots \dots \dots \text{ec. 1.1.8}$$

De la (ec. 1.1.8) tenemos que:

$$C_{Ai} = \frac{P_{Ab}k_G + C_{Ab}k_L}{k_G H + k_L} \dots \dots \dots \text{ec. 1.1.9}$$

Sustituyendo (ec. 1.1.9) en (ec. 1.1.3):

$$N_{Ai} = k_L \left(\frac{P_{Ab}k_G + C_{Ab}k_L}{k_G H + k_L} - C_{Ab} \right) \dots \dots \dots \text{ec. 1.1.10}$$

Arreglando la (ec. 1.1.10) tenemos:

$$N_{Ai} = \frac{1}{\frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L}} (P_{Ab} - H C_{Ab}) \dots \dots \dots \text{ec. 1.1.11}$$

Con la ecuación anterior se expresa el flux en términos de los coeficientes globales de transferencia de masa de cada fase, es decir:

$$R = \frac{1}{\frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L}} \dots \dots \dots \text{ec. 1.1.12}$$

Se puede apreciar en la ecuación 1.1.12 que las resistencias individuales no son totalmente aditivas, sino que están relacionadas por la constante de Henry.

Lo mejor es expresar el flux del gas en términos de un solo coeficiente de transferencia de masa en el que se incluya la resistencia tanto de la fase gas como de la fase líquida, al que se llamara K_G , el cual esta expresado en [mol/cm²*h*atm] y más aún en términos de una concentración de equilibrio

P_A^* también expresada en [atm], para eso se puede expresar la ecuación 1.1.11 de la siguiente forma:

$$N_{Ai} = K_G (P_{Ab} - P_A^*) \dots \dots \dots \text{ec. 1.1.13}$$

En donde K_G está definido como:

$$K_G = \frac{1}{\frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L}} \dots \dots \dots \text{ec. 1.1.14}$$

En sistemas en los que el soluto presente en el gas es poco soluble en el líquido la constante de Henry es grande, entonces la transferencia de masa se encuentra controlada por la fase líquida, por el contrario si el soluto presente en el gas es muy soluble en el líquido la constante de Henry es pequeña entonces la transferencia de masa estará controlada por la fase gas.

Esquemáticamente los componentes se difunden desde la fase líquida hasta la fase gaseosa mediante la siguiente secuencia^[4]:

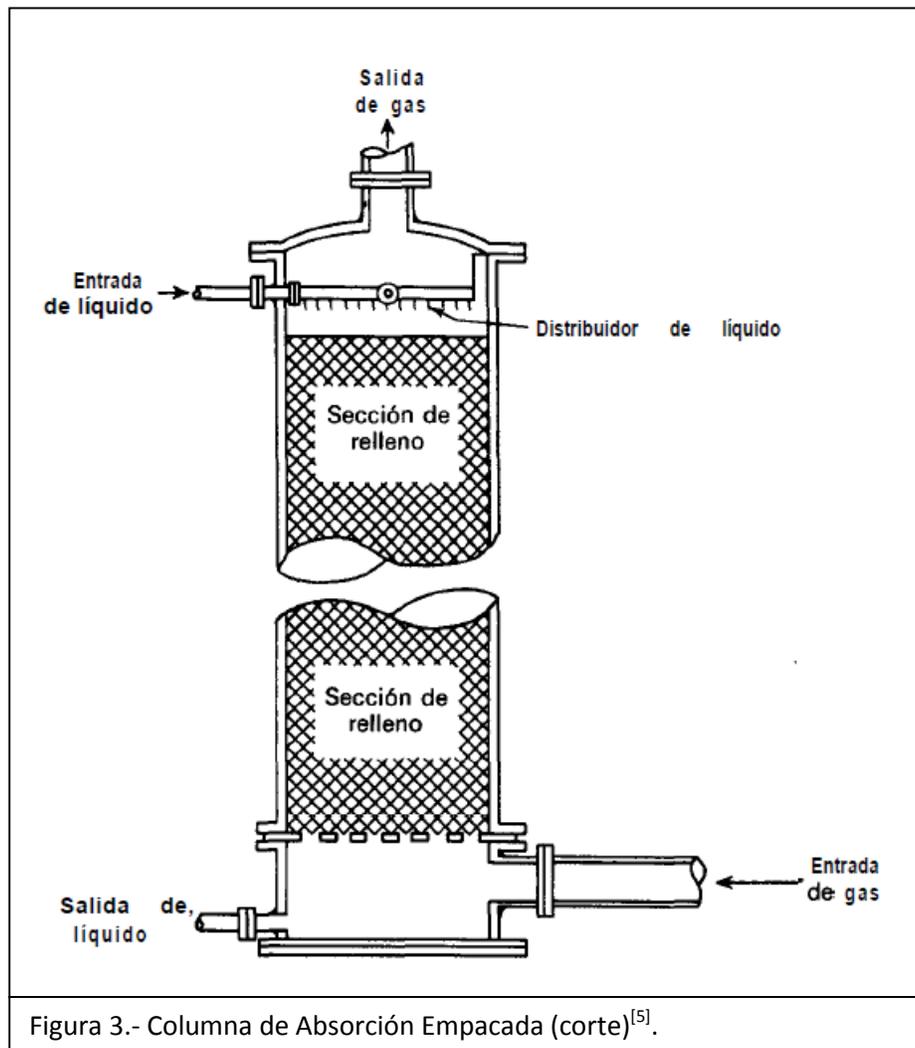
- a.- Difusión de uno o más componentes desde el seno de la fase gas hasta la interfase gas-líquido.
- b.- Difusión de los componentes desde la interfase hasta el seno de la fase líquida.

En una columna de absorción empacada el absorbente se extiende sobre toda la superficie proporcionada por los empaques, aumentando el área de contacto entre ambas fases, mejorando la absorción.

Otro factor que mejora la transferencia de masa en las columnas de absorción empacadas es el flujo a contracorriente entre el gas y el líquido, esto porque genera régimen de flujo turbulento dentro de la columna.

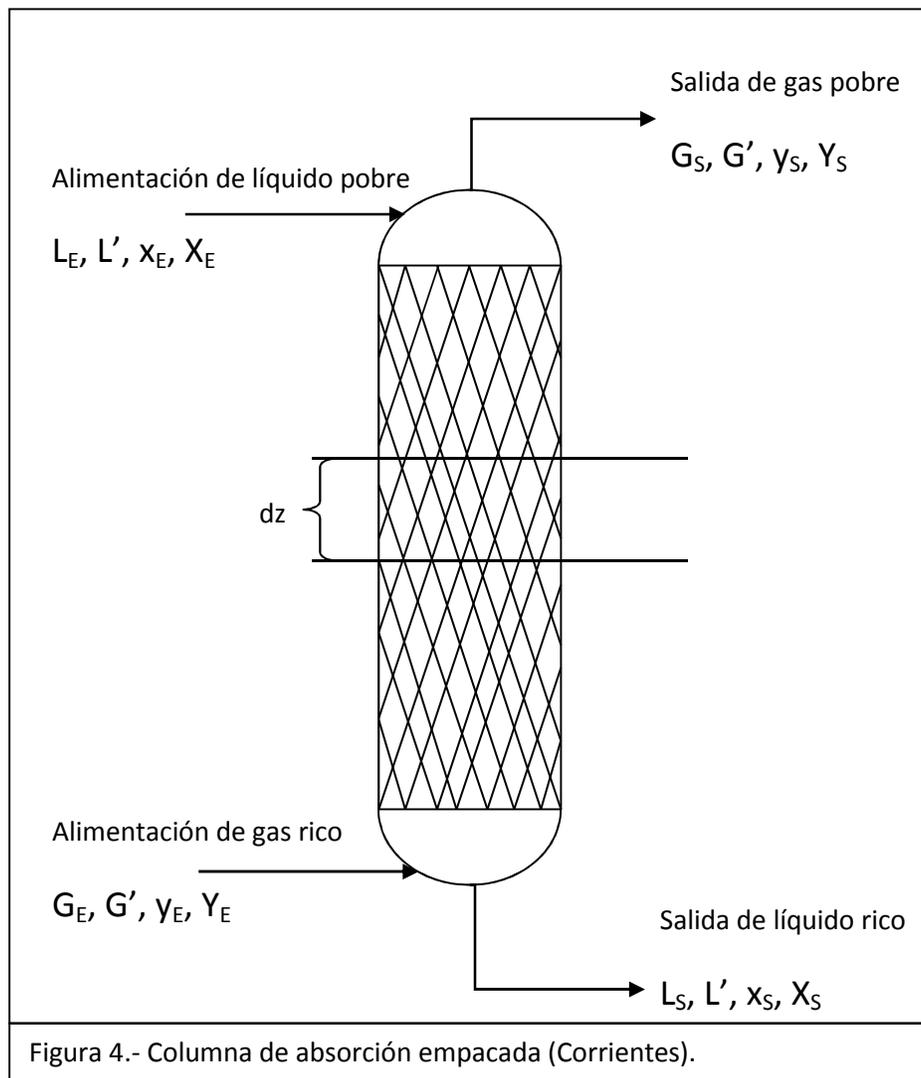
1.2 Diseño de columnas de absorción física empacadas.

El tipo común de una columna de absorción empacada consiste en una carcasa cilíndrica que contiene un material de relleno inerte. En ellos el líquido y el gas circulan a contracorriente con una amplia área de contacto entre el líquido y el gas como se muestra en la siguiente figura.



En una columna empacada lo más importante en cuanto al diseño es definir la altura de la sección que ocuparán los empaques dentro de la columna,

esto se hace a partir del cálculo del número de unidades de transferencia (NUT) y de la altura de cada una de éstas (HUT). Para esto es necesario plantear la ecuación de balance de materia considerando estado estacionario^[5]. Teniendo en cuenta que la alimentación de gas a la columna es una mezcla formada por el compuesto a remover (soluto) y otros compuestos que se considera no se absorben, a los que se les llamará inertes, la alimentación del líquido puede ser el absorbente puro o una dilución o mezcla con otros líquidos (véase Figura 4).



En la figura anterior, los términos G_E y L_E se refieren al flux de alimentación de gas y de líquido expresado en $[\text{mol/h}\cdot\text{m}^2]$; los términos G_S y L_S expresan los flujos de salida expresados en las mismas unidades que los de entrada; x_E, y_E, x_S e y_S son la fracción molar del soluto en las corrientes de entrada y salida según sea el subíndice; X_E, Y_E, X_S e Y_S son la relación molar del soluto con respecto del inerte en la entrada o la salida según sea el subíndice, por ultimo L' y G' son los flux de inerte expresados en $[\text{mol/h}\cdot\text{m}^2]$.

Considerando las entradas y las salidas se tiene:

$$L_E + G_E = L_S + G_S$$

$$L_E - L_S = G_S - G_E$$

$$dL = -dG \dots \dots \dots \text{ec. 1.2.1}$$

El cambio del flujo molar del soluto por sección transversal de columna empacada está dado por:

$$\frac{dn}{A} = g(Gy) = d(G'Y) = G'dY \dots \dots \dots \text{ec. 1.2.2}$$

En donde:

" dn/A " esta expresado en $[\text{mol/h}\cdot\text{m}^2]$.

" y " es la fracción mol del soluto en el gas.

" Y " es la relación molar que existe entre el soluto y el gas inerte.

La relación molar del soluto con respecto al inerte se puede expresar también de la siguiente manera:

$$Y = \frac{y}{1-y} \Rightarrow dY = \frac{dy}{(1-y)^2} \dots \dots \dots ec. 1.2.3$$

Remplazando los términos de la ecuación 1.2.3 en la ecuación 1.2.2 se tiene:

$$\frac{dn}{A} = G' dY = G' \frac{dy}{(1-y)^2} \dots \dots \dots ec. 1.2.4$$

"G'" no es más que el flujo de inerte, que se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$G' = G (1-y) \dots \dots \dots ec. 1.2.5$$

Con esto se puede expresar la ecuación 1.3.4 de la siguiente forma:

$$\frac{dn}{A} = G' \frac{dy}{(1-y)^2} = G (1-y) \frac{dy}{(1-y)^2} = G \frac{dy}{1-y} \dots \dots \dots ec. 1.2.6$$

Se sabe de la ecuación 1.1.2 y 1.1.6 que el flux de soluto que se transfiere de la fase liquida a la gaseosa es:

$$N_A = k_G (P_A - P_{Ai}) \dots \dots \dots ec. 1.2.2'$$

Entonces los moles absorbidos considerando sólo el elemento de torre de altura dz se pueden calcular con:

$$dn = k_G (P_A - P_{Ai}) a A dz = k_y (y - y_i) a A dz \dots \dots \dots ec. 1.2.7$$

En donde:

“ k_y ” es el coeficiente de transferencia de masa del lado del gas expresado en $[\text{mol}/\text{h}\cdot\text{m}^2]$.

“ a ” es el área de superficial aportada por cada cm^3 de empaques dentro de la torre expresada en $[\text{m}^2/\text{m}^3]$.

“ A ” es el área transversal de la torre expresada en $[\text{m}^2]$.

“ dz ” es la altura del elemento de torre expresado en $[\text{m}]$.

Reacomodando la ecuación 1.3.7 e igualándola con la ecuación 1.3.6 se tiene:

$$\frac{dn}{A} = G \frac{dy}{1-y} = k_y (y - y_i) a dz \dots \dots \dots \text{ec. 1.2.8}$$

Acomodando los términos de la ecuación anterior:

$$dz = \frac{G}{k_y a} \frac{dy}{(1-y)(y - y_i)} \dots \dots \dots \text{ec. 1.2.9}$$

Integrando:

$$\int_0^Z dz = \int_{y_S}^{y_E} \frac{G}{k_y a} \frac{dy}{(1-y)(y - y_i)}$$
$$Z = \int_{y_S}^{y_E} \frac{G}{k_y a} \frac{dy}{(y - y_i)(1-y)} \dots \dots \dots \text{ec. 1.2.10}$$

Para resolver la integral, Foust^[13] propone utilizar un parámetro poco cambiante a lo largo de la torre, el cual se puede suponer constante, este parámetro está establecido por la relación que existe entre la fracción molar del gas inerte tanto en el seno como en la interfase y está definido por la siguiente ecuación:

$$(1 - y)_{iM} = \frac{(1 - y_i) - (1 - y)}{\ln \frac{1 - y_i}{1 - y}} \dots \dots \dots ec. 1.2.11$$

Aplicando este término en la ecuación 1.2.10 se tiene:

$$Z = \frac{G}{k_y a (1 - y)_{iM}} \int_{y_s}^{y_E} \frac{(1 - y)_{iM}}{(y - y_i) (1 - y)} dy \dots \dots \dots ec. 1.2.12$$

La ecuación 1.2.12 es conocida como "Ecuación general de diseño de torres de absorción empacadas". En ella la altura de las unidades de transferencia está establecida por:

$$HUT = \frac{G}{k_y a (1 - y)_{iM}} \dots \dots \dots ec. 1.2.12'$$

El número de unidades de transferencia está definido por:

$$NUT = \int_{y_s}^{y_E} \frac{(1 - y)_{iM}}{(y - y_i) (1 - y)} dy \dots \dots \dots ec. 1.2.12''$$

Como ya se mencionó, el término "(1-y)_{iM}" es prácticamente constante, al igual que lo es el término "(1-y)" que representa la fracción mol del inerte, así la ecuación 1.2.12'' puede ser reescrita como sigue:

$$NUT = \left[\frac{(1-y)_{iM}}{(1-y)} \right]_{\text{promedio}} \int_{y_S}^{y_E} \frac{dy}{(y-y_i)} \dots \dots \dots \text{ec. 1.2.12''}$$

Para el caso particular en el que las líneas de operación y de equilibrio son rectas, la integral en la ecuación 1.2.12'' está resuelta como sigue:

$$\int_{y_S}^{y_E} \frac{dy}{(y-y_i)} = \frac{y_E - y_S}{(y-y_i)_M} \dots \dots \dots \text{ec. 1.2.13}$$

En donde:

$$(y-y_i)_M = \frac{(y_E - y_{iE}) - (y_S - y_{iS})}{\ln \frac{y_E - y_{iE}}{y_S - y_{iS}}} \dots \dots \dots \text{ec. 1.2.14}$$

La forma de determinar los valores de las fracciones mol en la interfase, ya sea a la entrada, a la salida o en cualquier punto de la columna es a partir de la línea de equilibrio, la línea de unión y la línea de operación de la torre, la cual también se establece a partir del balance de materia de la siguiente manera:

$$L_E + G_E = L_S + G_S$$

$$L' * X_E + G' * Y_E = L' * X_S + G' * Y_S$$

$$L'(X_E - X_S) = G'(Y_S - Y_E)$$

$$\frac{L'}{G'} = \frac{(Y_S - Y_E)}{(X_E - X_S)} \dots \dots \dots \text{ec. 1.3.15}$$

La ecuación 1.3.15 representa la línea de operación de la columna de absorción empacada. La línea de unión se definió con anterioridad en la ecuación 1.1.8 y la línea de equilibrio está establecida para cada sistema en particular.

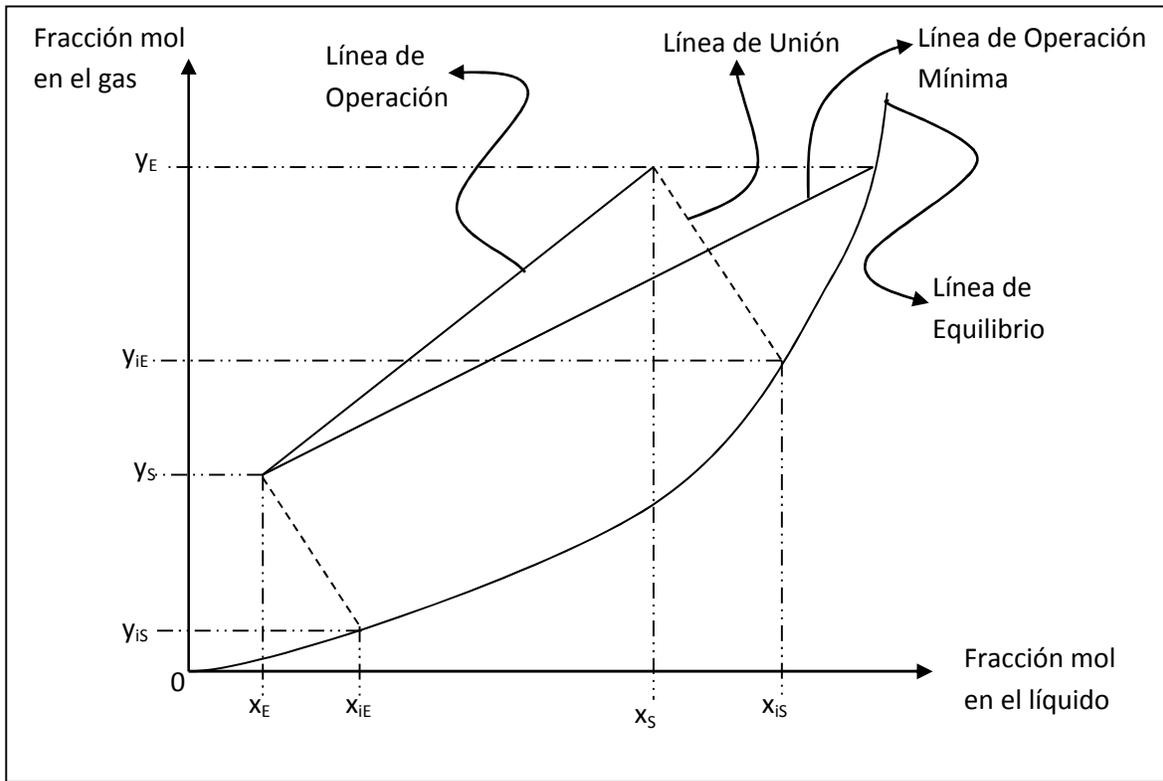


Figura 5.- Líneas de operación, unión y equilibrio. Método gráfico para determinar los valores a la interfase. El eje vertical representa la fracción mol del soluto en el gas mientras que el horizontal muestra la fracción mol del soluto en el líquido ^[modificada de la referencia 13].

En procesos de absorción, la alimentación del gas así como su composición a la entrada y la salida son valores establecidos y las necesidades del proceso establecen la composición del líquido a la entrada, por lo tanto la alimentación del líquido es un parámetro establecido por quien diseña la

columna. La línea de operación que logra la separación deseada con el flujo de líquido mínimo es la "Línea de Operación Mínima" (ver Figura 5). Un flujo de líquido muy pequeño da como resultado torres de absorción muy altas lo cual es costoso y por otro lado flujos de líquido muy grandes provocan un diámetro de columna considerable. Una buena aproximación se obtiene con un valor de alrededor de 1.5 veces la pendiente de la línea de operación mínima.

En la ecuación 1.2.12' se puede notar que la altura de las unidades de transferencia se estima a partir del coeficiente de transferencia de masa "k_y", el cual sólo se puede determinar de manera experimental. Existen ecuaciones determinadas empíricamente que permiten estimar el valor del HUT, como la siguiente que es usada para mezclas diluidas de gases^[6]:

$$HUT = \alpha G_y^\beta G_x^\gamma Sc^{0.5} \dots \dots \dots ec. 1.2.16$$

En donde:

"HUT" se obtiene en [m].

"G_y" es el flux del gas expresado en [kg/s*m²].

"G_x" es el flux del líquido expresada en las mismas unidades que el del gas.

"Sc" es el número de Schmidt definido como:

$$Sc = \frac{\mu}{\rho * D} \dots \dots \dots ec. 1.2.17$$

Donde:

" μ " es la viscosidad de la mezcla gaseosa expresada en [kg/m*s].

" ρ " es la densidad de la mezcla gaseosa en [kg/m³].

"D" es la difusividad del soluto A en el gas en [m²/s].

" α, β y γ " en la ecuación 1.2.16 son constantes para cada empaque según se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1.- Valores de las constantes para la ecuación 1.2.16 ^[6] .					
Tipo de empaque	α	β	γ	Intervalo de valores	
				Gy	Gx
Anillos Rasching					
3/8 pulgada	0.620	0.450	-0.470	0.271-0.687	0.678-2.034
1 pulgada	0.557	0.320	-0.510	0.271-0.814	0.678-6.100
1.5 pulgadas	0.830	0.380	-0.660	0.271-0.950	0.678-2.034
1.5 pulgadas	0.689	0.380	-0.400	0.271-0.950	2.034-6.100
2 pulgadas	0.894	0.410	-0.450	0.271-1.085	0.678-6.100
Sillas Berl					
0.5 pulgadas	0.541	0.300	-0.740	0.271-0.950	0.678-2.034
0.5 pulgadas	0.367	0.300	-0.240	0.271-0.950	2.034-6.100
1 pulgada	0.461	0.360	-0.400	0.271-1.085	0.542-6.100
1.5 pulgadas	0.652	0.320	-0.450	0.271-1.356	0.542-6.100

Otro aspecto de importancia para el diseño de columnas empacadas es la caída de presión. Hay tres factores principales que influyen en este aspecto^[5]:

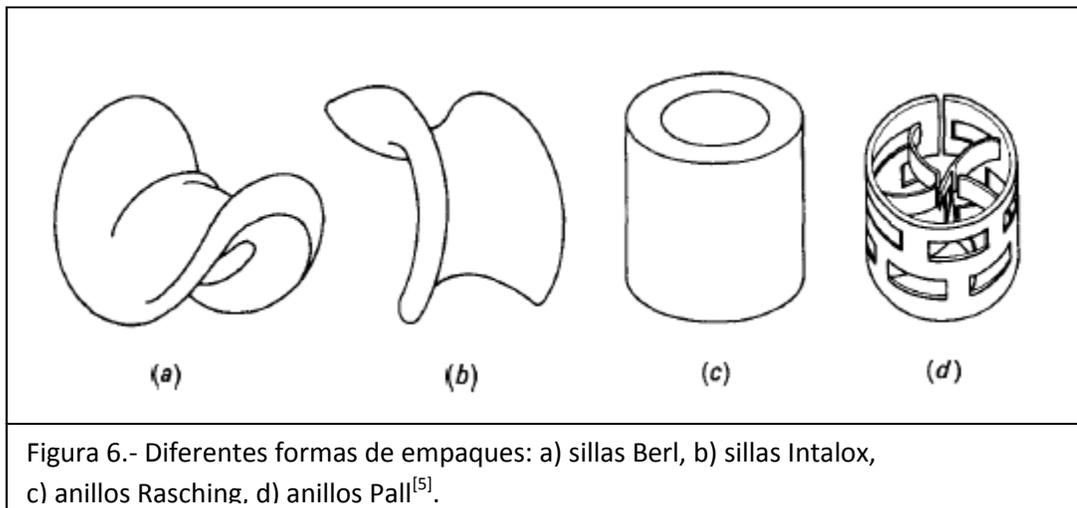
- I. El porcentaje de espacios vacíos dentro de la columna.

II. El tamaño y la forma de los empaques.

III. Las densidades y los flujos de las corrientes de alimentación del gas y del líquido.

Los empaques, es decir el relleno de la torre, juegan un papel muy importante en el diseño. Los principales requerimientos de los empaques para las columnas de absorción son: 1) deben ser químicamente inertes a los fluidos que manejará la columna, 2) deben ser mecánicamente resistentes pero sin tener un peso excesivo, 3) deben permitir un paso adecuado de los fluidos, 4) deben proporcionar un buen contacto entre las corrientes y 5) deben ser de un costo razonable.

En el mercado existen diferentes tipos de empaques (ver Figura 6).

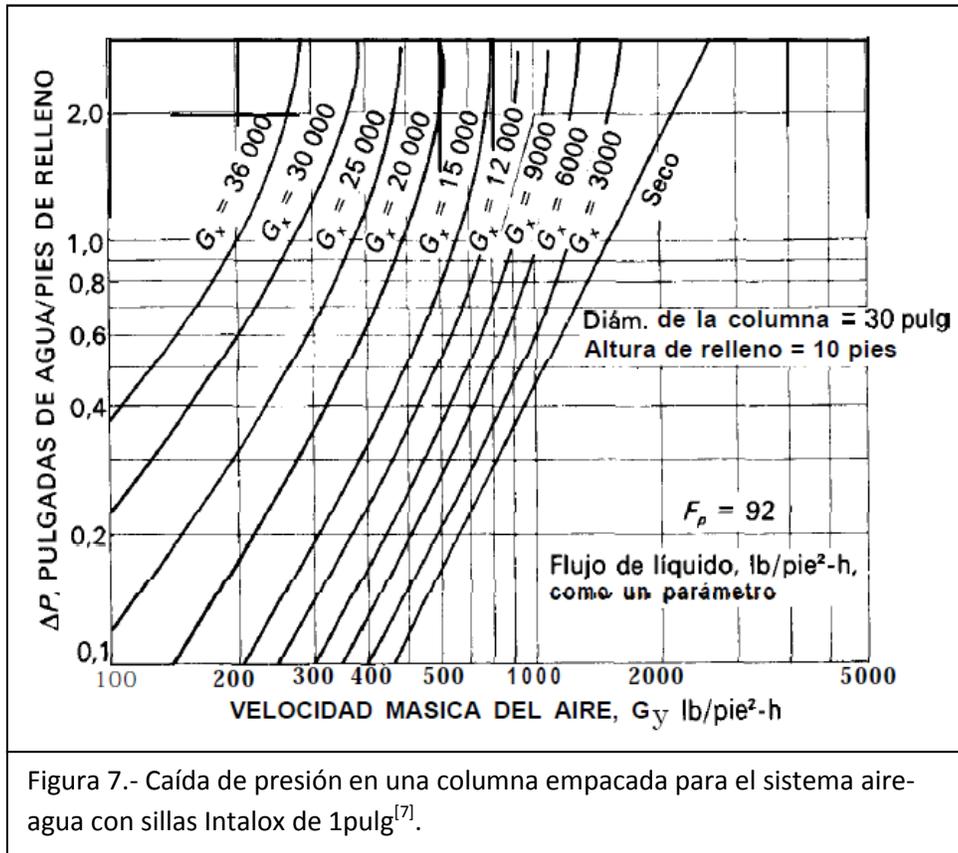


Cuando el líquido circula a lo largo de la columna, éste tiende a acumularse en los espacios huecos por efecto de la circulación a contracorriente del gas, a este fenómeno se le conoce como retención dinámica.

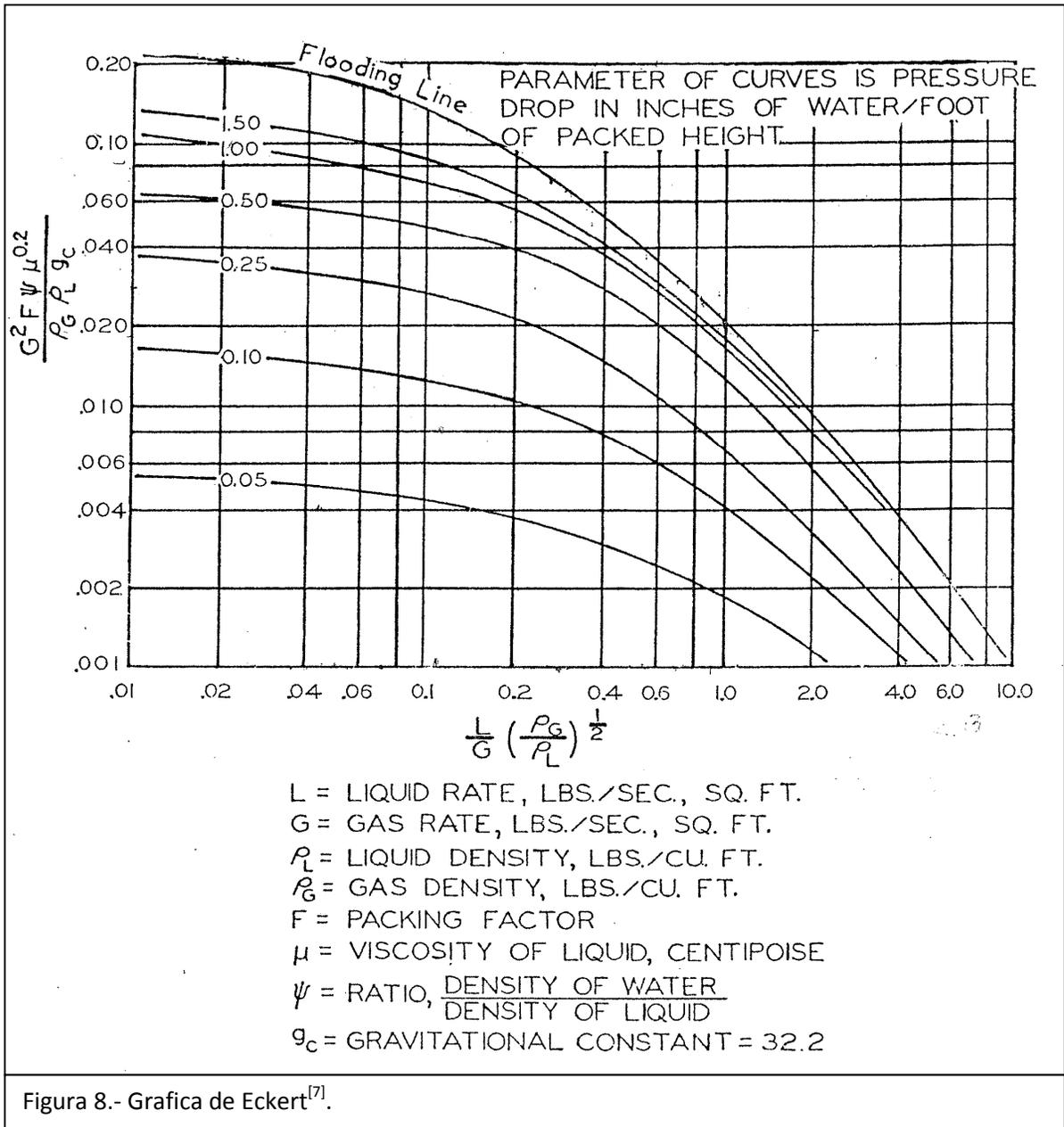
Para una velocidad de líquido constante, la caída de presión aumenta con el incremento del flujo de gas. Si la cantidad de gas llega a ser suficiente, la columna alcanza un estado en el cual ocurre una retención dinámica grande conocido como región de carga.

Esta región se puede definir según Eckert^[7] como el punto sobre la curva donde la pendiente es mayor a 2.

Después de este punto la caída de presión aumenta sustancialmente con el aumento del flujo de gas, hasta que se alcanza un punto crítico llamado punto de inundación, en este punto el líquido se ve impedido en circular hacia abajo por efecto de la gravedad por la velocidad tan alta del gas que circula en contracorriente. En este punto la transferencia de masa se detiene, la torre se inunda y la caída de presión se dispara exponencialmente. La operación en este punto debe evitarse, por lo regular una columna bien diseñada opera entre el 50 y el 80 por ciento de la inundación.



Para calcular el diámetro que tendrá la columna se comienza por seleccionar el tipo de empaques que se usará como relleno, se tiene que especificar el tamaño nominal de estos y no deberá ser superior a 1/8 del diámetro de la columna para así minimizar la canalización del líquido a la pared interna de la columna.



Para calcular el diámetro de la columna es necesario calcular todos los parámetros presentes en la gráfica de Eckert (ver Figura 8).

Se determina la relación L/G en el fondo de la columna a través de un balance de materia y se procede a calcular el valor del eje x de la gráfica de Eckert con la siguiente ecuación:

$$\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \dots \dots \dots \text{ec. 1.2.18}$$

Se obtiene un valor para el eje "y" a partir del resultado de la ecuación 1.2.18 y la línea de inundación de la gráfica. Con ese valor se calcula la "G" de inundación a partir de la siguiente ecuación:

$$G_{in} = \sqrt{\frac{y * \rho_G * \rho_L * g_c}{F * \psi * \mu^{0.2}}} \dots \dots \dots \text{ec. 1.2.19}$$

El valor de "F" (factor de empaque) se puede leer de la siguiente tabla.

		Tabla 2.- Factores de empaque ^[7] .										
		Tamaño Nominal del Empaque (pulgadas)										
Tipo de empaque	Material	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	1	1	1	3		
		1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	1	1/4	1/2	2	3	1/2
Sillas Intalox	Cerámica	725	330	200	-	145	98	-	52	40	22	-
Sillas Intalox	Plástico	-	-	-	-	-	33	-	-	21	16	-
Anillos Raschig	Cerámica	1600	1000	580	380	255	155	125	95	65	37	-
Sillas Berl	Cerámica	900	-	240	-	170	110	-	65	45	-	-
Anillos Pall	Plástico	-	-	-	97	-	52	-	32	25	-	16
Anillos Pall	Metal	-	-	-	70	-	48	-	28	20	-	-
Anillos Raschig (1/32)	Metal	700	390	300	170	155	115	-	-	-	-	-
Anillos Raschig (1/16)	Metal	-	-	410	290	220	137	110	83	57	32	-

El valor de "G_{in}" se multiplica por el porcentaje de inundación en el cual trabajará la columna (entre 50 y 80%).

Se calcula el área de la columna (ec. 1.2.20) empleando el flujo másico total de gas evaluado en el fondo de la columna.

1.3 Absorción Reactiva

La absorción reactiva es un fenómeno de absorción acompañado de una reacción química. En este fenómeno ocurren ciertos pasos los cuales son^[3]:

- a.- Difusión de uno o más componentes desde el seno de la fase gas hasta la interfase gas-líquido.
- b.- Difusión de los componentes desde la interfase hasta el seno de la fase líquida.
- c.- Reacción química en la fase líquida.
- d.- Difusión de los reactivos y productos de la reacción en la fase líquida.

La reacción química del soluto en la fase líquida mejora la transferencia de masa debido a que la transformación del soluto absorbido reduce la presión parcial en el equilibrio del soluto y como consecuencia aumenta la diferencia de concentración entre el gas y la interfase. Además el coeficiente de transferencia de masa de la fase líquida aumenta lo que contribuye a aumentar la rapidez de absorción^[1].

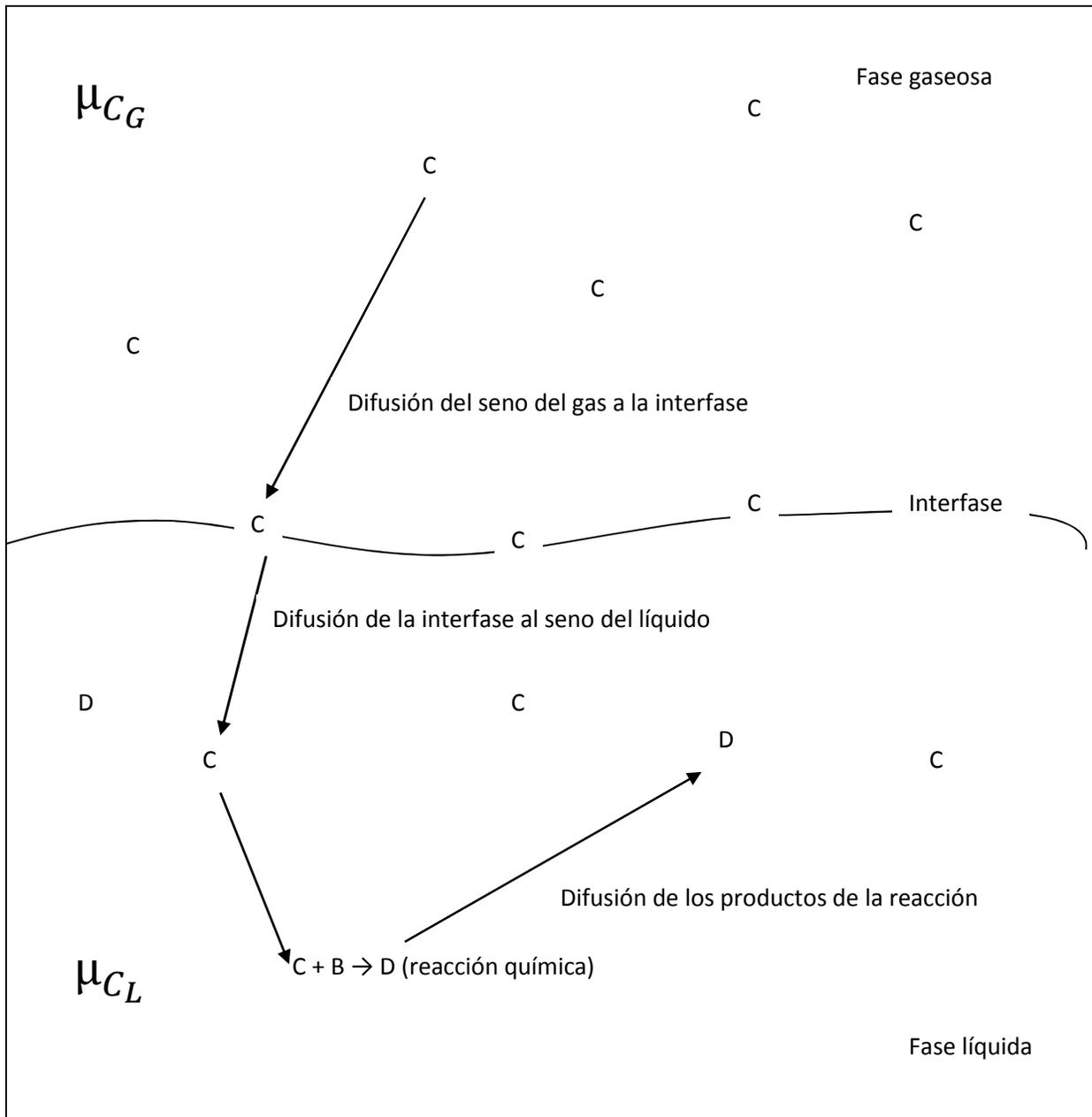


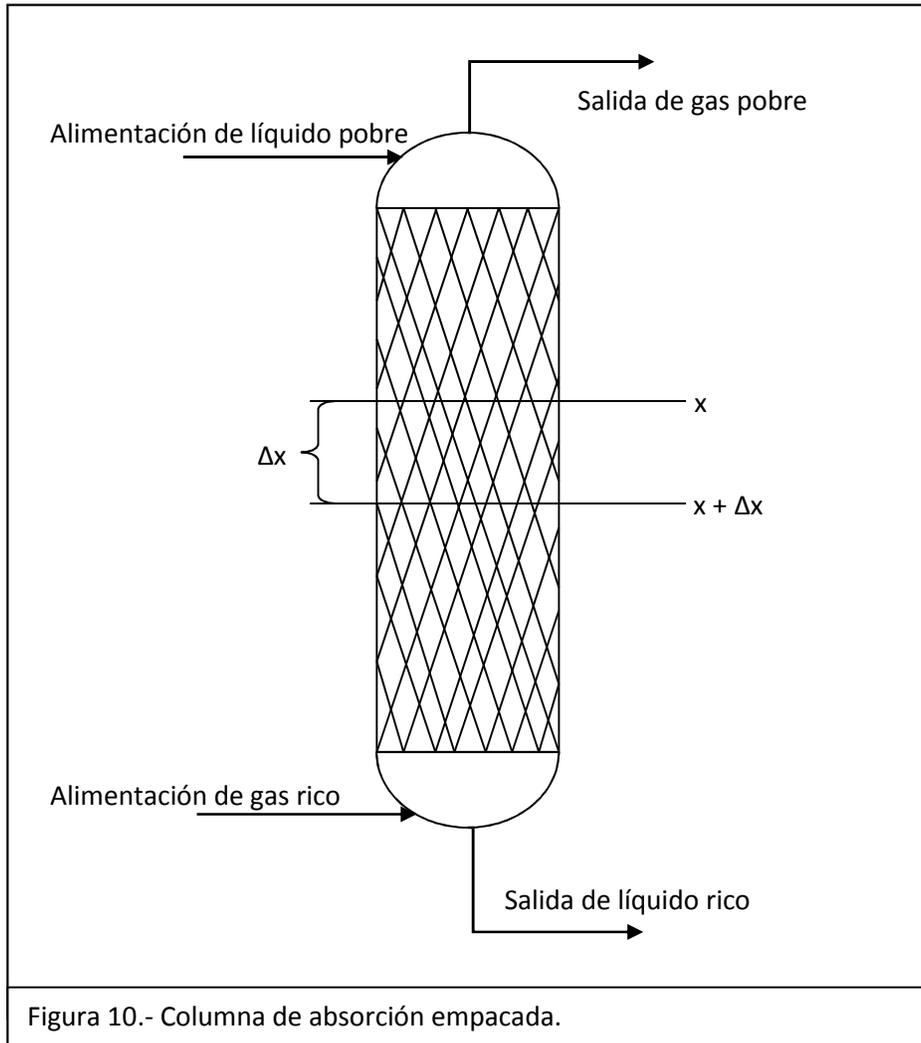
Figura 9.- Proceso de absorción del componente C provocado por una diferencia de potenciales químicos.

El potencial químico del componente C en el líquido (μ_{C_L})

es menor que

El potencial químico del componente C en el gas (μ_{C_G})

Considerando la figura siguiente, se procederá a plantear el balance de materia para un elemento diferencial de columna considerando una reacción química en el seno de la fase líquida.



El líquido pobre se refiere al fluido en el cual se absorberá el soluto de interés, el líquido rico es el fluido en el cual ya se ha absorbido el soluto, el gas rico posee una gran concentración del soluto y es de donde se pretende

remover el soluto y el gas pobre tiene una concentración menor del soluto dado que ya se ha absorbido en el líquido.

La ecuación diferencial que representa los fenómenos de difusión, convección y reacción química puede ser escrita vectorialmente como:

$$\left[\begin{array}{c} \frac{\delta C_A}{\delta t} \\ \{\text{acumulación}\} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \underline{v} \cdot \nabla C_A \\ \{\text{convección}\} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} D_{AL} \nabla^2 C_A \\ \{\text{transporte molecular}\} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} R_A \\ \{\text{rapidez de reacción}\} \end{array} \right] \\ = 0 \dots \dots \dots \text{ec. 1.3.1}$$

El sentido de la ecuación anterior es que considera que la densidad y el coeficiente de difusión son constantes y además se cumplen las condiciones hidrodinámicas que postula la teoría de la película en las cuales gobierna el estado estacionario en una escala macromolecular.

Otra ecuación diferencial para un elemento de volumen que contiene el soluto absorbido en la fase líquida en unidades de flujo molar y que circula por la fracción de huecos "ε" entre empaques es:

$$\left[\begin{array}{c} -D_L \varepsilon S \frac{\delta[A^0]}{\delta x} \Big|_x \\ \{\text{difusión de entrada}\} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \varepsilon S L [A^0] \Big|_x \\ \{\text{convección de entrada}\} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} k_{LR} a E \Delta x S (A^* - A^0) \\ \{\text{rapidez de absorción}\} \end{array} \right] \\ = \left[\begin{array}{c} -D_L \varepsilon S \frac{\delta[A^0]}{\delta x} \Big|_{x+\Delta x} \\ \{\text{difusión de salida}\} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \varepsilon S L [A^0] \Big|_{x+\Delta x} \\ \{\text{convección de salida}\} \end{array} \right] \\ + \left[\begin{array}{c} \varepsilon S \Delta x R_A \\ \{\text{rapidez de reacción}\} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \varepsilon S \Delta x \frac{\delta[A^0]}{\delta t} \\ \{\text{acumulación}\} \end{array} \right] \dots \dots \dots \text{ec. 1.3.2}$$

Arreglando la ecuación anterior y tomando el límite cuando Δx tiende a cero se obtiene^[9]:

$$\left[\begin{array}{c} L \frac{\delta[A^0]}{\delta x} \\ \{\text{convección}\} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \frac{\delta[A^0]}{\delta t} \\ \{\text{acumulación}\} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \frac{k_{LR} a E}{\varepsilon} (A^* - A^0) \\ \{\text{absorción}\} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} R_A \\ \{\text{rapidez de reacción}\} \end{array} \right] \\ = \left[\begin{array}{c} D_L \frac{\delta^2[A^0]}{\delta x^2} \\ \{\text{difusión}\} \end{array} \right] \dots \dots \dots \text{ec. 1.3.3}$$

En las ecuaciones anteriores se tiene que:

“L” es la velocidad del líquido en [cm/s].

“ A^0 ” es la concentración del gas soluble en el seno de la fase líquida en [mol/cm³].

“t” es el tiempo expresado en segundos.

“ k_{LR} ” es el coeficiente de transferencia de masa de la película del líquido en [cm/s].

“a” es la relación área-volumen en [1/cm].

“ A^* ” es la concentración de equilibrio del gas en la interfase en [mol/cm³].

“ R_A ” es la rapidez de reacción en [mol/cm³*s].

“ D_L ” es el coeficiente de difusión del gas soluble en el líquido en [cm²/s].

“ ε ” es la fracción de huecos de la columna empacada.

“S” es el área de la sección transversal de la columna empacada en [cm²].

“E” es un número adimensional que expresa el grado en que la reacción química afecta la absorción, este término es llamado por Danckwerts^[8] “factor de mejora”.

En lo que a la transferencia de energía dentro de una columna de absorción se refiere, esta no suele ser considerada en la mayoría de los casos, ya que el calor generado por la absorción es prácticamente nulo, entonces la transferencia de energía sólo queda asociada a la diferencia de temperatura que existe entre las corrientes líquida y gaseosa que se ponen en contacto dentro de la columna. Pero en los casos en los que ocurre una reacción exotérmica en el seno de la fase líquida entre el soluto y el absorbente dentro de la columna el calor generado puede llegar a ser de consideración.

Tomando en cuenta lo anteriormente mencionado, la transferencia de energía dentro de una columna empacada en un elemento diferencial de volumen, puede ser descrita por la siguiente ecuación:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Flujo de energía} \\ \text{que entra} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Flujo de} \\ \text{energía} \\ \text{que sale} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Cantidad de} \\ \text{energía} \\ \text{acumulada} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Cantidad de} \\ \text{energía} \\ \text{generada} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Cantidad de} \\ \text{energía} \\ \text{intercambiada} \\ \text{con el exterior} \end{array} \right\}$$

.....ec. 1.3.4

Esta ecuación indica que la cantidad de calor que se transfiere dentro de una columna empacada ocurre casi de manera simultánea y que algunos términos tienen más efecto que otros según la región de la columna que se esté observando.

La transferencia de energía dentro de la columna se lleva a cabo mediante dos mecanismos: la conducción y la convección. El calor generado por la reacción química se transfiere por conducción y convección desde el seno de la fase líquida hacia los empaques, a la fase gaseosa así como a las paredes de la columna. El calor transferido entre la columna y el medio ambiente puede ser prácticamente eliminado aislando la columna.

Así, de una manera similar al balance de materia podemos establecer el balance de energía para un elemento diferencial de volumen en unidades de calor de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 & \left[\frac{S q_x|_x}{\{\text{calor de entrada por conducción}\}} \right] + \left[\frac{S \rho C_p v_x (T - T_R)|_x}{\{\text{calor de entrada por convección}\}} \right] \\
 & = \left[\frac{S q_x|_{x+\Delta x}}{\{\text{calor de salida por conducción}\}} \right] + \left[\frac{S \rho C_p v_x (T - T_R)|_{x+\Delta x}}{\{\text{calor de entrada por convección}\}} \right] \\
 & + \left[\frac{S \Delta x \rho C_p \frac{\delta T}{\delta t}}{\{\text{acumulación de calor}\}} \right] - \left[\frac{S \Delta x (-\Delta H_R) R_A}{\{\text{calor generado por la reacción}\}} \right] \\
 & - \left[\frac{S \Delta x Q_V}{\{\text{calor intercambiado con el medio ambiente}\}} \right] \dots \dots \dots \text{ec. 1.3.5}
 \end{aligned}$$

Arreglando la ecuación anterior y tomando el límite cuando Δx tiende a cero se obtiene^[9]:

$$\left[\begin{array}{c} -k_{ax} \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \\ \{\text{conducción de calor}\} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \rho C_p v_x \frac{\delta T}{\delta x} \\ \{\text{convección de calor}\} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \rho C_p \frac{\delta T}{\delta t} \\ \{\text{acumulación de calor}\} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} (-\Delta H_R) R_A \\ \{\text{calor generado por la reacción}\} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} Q_v \\ \{\text{intercambio de calor con el medio ambiente}\} \end{array} \right] = 0 \dots \dots \dots \text{ec. 1.3.6}$$

En las ecuaciones anteriores tenemos que:

“ $q_x = \frac{Q_x}{S} = -k_{ax} \frac{dT}{dx}$ ” que es el flux de energía en [kcal/h*cm²].

“ k_{ax} ” es la conductividad térmica donde se incluye el transporte de energía a través de las fases de los fluidos y del sólido en el sentido axial en [kcal/h*cm*°C].

“ $Q_v = \frac{dq_x}{dV} = U a (T_2 - T_1)$ ” es el calor intercambiado por unidad de volumen empacado de la columna en [kcal/h].

“ U ” es el coeficiente total de transferencia de calor en [kcal/h*m²*°C].

“ T_1 ” es la temperatura de la superficie de la columna en [°C].

“ T_2 ” es la temperatura del medio ambiente en [°C].

“ dV ” es el volumen diferencial empacado de columna en [cm³].

“a” es la relación entre el área de intercambio de calor y la unidad de volumen de columna.

De esta manera con las ecuaciones 1.3.3 y 1.3.6 queda establecido el balance de materia así como el de energía para la columna de absorción empacada considerando el caso particular de que el soluto reacciona en el seno de la fase líquida, es decir un fenómeno de absorción reactiva.

1.3.1 El sistema reaccionante CO₂-MEA^[8]

Como bien se menciona en el título de esta tesis, el trabajo consistió en analizar el comportamiento dinámico para el proceso de absorción de CO₂ en MEA. Este proceso de absorción no es una absorción física simplemente, sino que es una absorción reactiva, es decir, como se mencionó en la sección anterior, el proceso de absorción está acompañado de una reacción entre el CO₂ y la MEA en el seno de la fase líquida.

En general, la reacción principal entre el CO₂ y aminas da como resultado la formación de un carbamato de amina:



La forma de la constante de equilibrio usualmente mostrada en la literatura es:

$$K_c = \frac{[\text{CO}_2][\text{R}_2\text{NH}]^2}{[\text{R}_2\text{NCOO}^-][\text{R}_2\text{NH}_2^+]} \dots \dots \dots ec. 1.3.7$$

El valor de K_c en el caso de la monoetanolamina a una temperatura de 20°C es de 9×10^{-6} [mol/L].

La cinética de la reacción hacia adelante esta dada por:

$$r_f = k_{Am} [CO_2][R_2NH] \dots \dots \dots ec. 1.3.8$$

Al equilibrio la cinética de la reacción hacia adelante es igual a la cinética de la reacción hacia atrás, así que se puede encontrar la cinética de la reacción hacia atrás de la siguiente forma:

$$r_r = k_{Am} [CO_2][R_2NH] \dots \dots \dots ec. 1.3.9$$

De este modo se puede escribir K_c de la siguiente manera:

$$K_c = \frac{r_r [R_2NH]}{k_{Am} [R_2NCOO^-] [R_2NH_2^+]} \dots \dots \dots ec. 1.3.10$$

Tomando en cuenta lo anterior, la ecuación que describe la cinética de la reacción hacia atrás es:

$$r_r = \frac{K_c k_{Am} [R_2NCOO^-] [R_2NH_2^+]}{[R_2NH]} \dots \dots \dots ec. 1.3.11$$

Con lo anterior se puede calcular la cinética de la reacción cuando no está en equilibrio a partir de la siguiente ecuación:

$$r = r_f - r_r = k_{Am} [R_2NH] \left([CO_2] - \frac{K_c [R_2NCOO^-] [R_2NH_2^+]}{[R_2NH]^2} \right) \dots \dots \dots ec. 1.3.12$$

La ecuación 1.3.12 puede ser escrita como:

$$r = k_{Am} [R_2NH]([CO_2] - [CO_2]_{equilibrio}) \dots \dots \dots ec. 1.3.13$$

Esto porque el segundo término dentro de los paréntesis en la ecuación 1.3.12 es igual a la concentración de CO₂ al equilibrio según se puede revisar en la ecuación 1.3.7.

El valor de k_{Am} en el caso de la monoetanolamina a una temperatura de 25°C es de 7600 [L/mol*s].

Cuando se calculan las composiciones al equilibrio en una solución de CO₂ con aminas se puede notar que la concentración de CO₂ es más pequeña que [R₂NCOO⁻]. Teniendo en cuenta esto podemos suponer que [R₂NCOO⁻] es prácticamente igual al CO₂ absorbido.

1.4 Dinámica de Procesos

La creación de modelos dinámicos y el control automático es vital en el avance de la ingeniería y la ciencia, es muy importante en las operaciones industriales en el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad, flujo, etc. en la industria del procesos.

Previo a explicar el análisis dinámico de un sistema es necesario definir algunos términos básicos^[10]:

Variable medible: Esta es aquella cantidad o condición que se mide, también suelen ser nombradas variables de salida.

Variable manipulada: Es la cantidad o condición que se modifica para afectar el valor de la variable medible, estas son variables de entrada.

Perturbaciones: Es una señal que afecta el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación es generada dentro del sistema se denomina interna, en tanto que una perturbación externa se produce fuera del sistema y es una entrada.

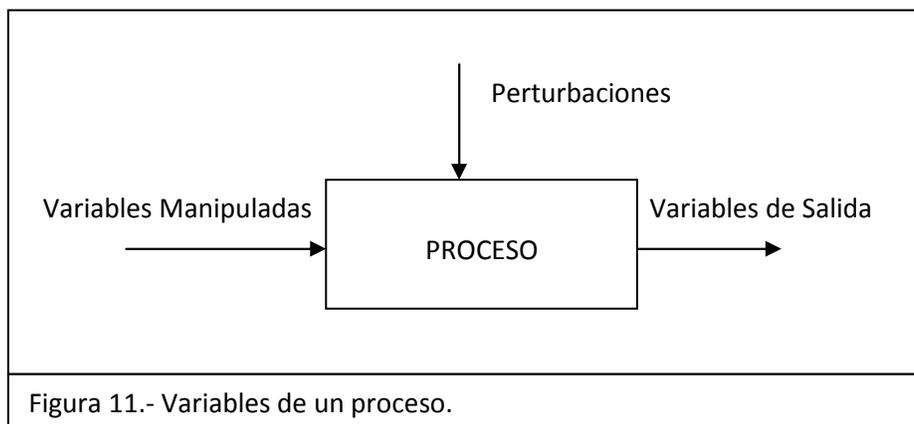


Figura 11.- Variables de un proceso.

Para construir un modelo que describa el comportamiento dinámico de un proceso, es decir, un modelo que describa al proceso en el tiempo, es necesario mencionar primero las tres características básicas que conforman un modelo dinámico.

La primera de estas características es la "dinámica", la cual se refiere a que tan rápida es la respuesta en las variables de salida a cambios en las variables de entrada. Un proceso muy dinámico responde rápido a los cambios en las variables de entrada.

Otra característica es la "sensibilidad", con esta se nota que tan grande es el efecto de un cambio en las variables de entrada sobre las variables de salida. En un proceso muy sensible, las variables de entrada o sólo algunas de ellas tienen un gran efecto sobre las variables de salida.

La última de estas características es la "estabilidad". Cuando se modifican las condiciones de estado estacionario de un proceso estable, se alcanza un nuevo estado estacionario, por el contrario si el proceso es inestable, no se alcanza un nuevo estado estacionario después de hacer la modificación.

Para establecer el modelo dinámico de un proceso se parte de los balances de momento, materia y energía de este.

Balance General de Materia

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Acumulación} \\ \text{de materia} \\ \text{en el sistema} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Materia} \\ \text{que entra} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Materia} \\ \text{que sale} \end{array} \right\} \dots \dots \dots ec. 1.4.1$$

Balance General de Energía

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Energía} \\ \text{acumulada} \\ \text{en el sistema} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Energía} \\ \text{que entra} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Energía} \\ \text{que sale} \end{array} \right\} \pm \left\{ \begin{array}{l} \text{Energía} \\ \text{termica} \end{array} \right\} \pm \left\{ \begin{array}{l} \text{Energía} \\ \text{mecanica} \end{array} \right\} \dots \dots \dots ec. 1.4.2$$

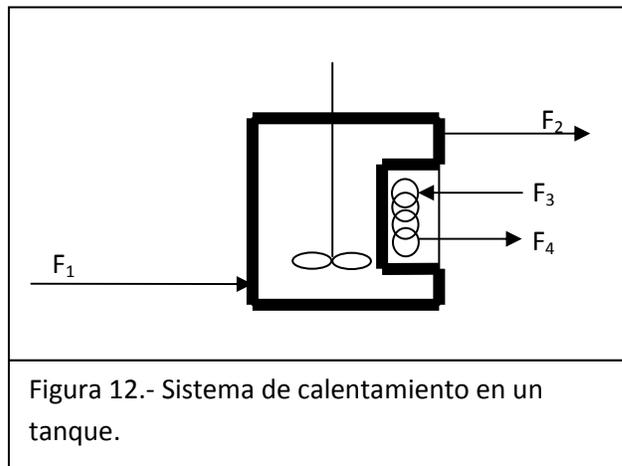
Para la creación del modelo dinámico las variables se expresan como variables de desviación, las cuales se definen como el valor de la variable en el tiempo menos el valor de la misma variable en el estado estacionario original.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Variable de} \\ \text{desviacion} \end{array} (y') \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Valor de} \\ \text{la variable} (y) \\ \text{en el tiempo} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Valor de} \\ \text{la variable en} \\ \text{estado estacionario} (y_0) \\ \text{original} \end{array} \right\} \dots \dots \dots ec. 1.4.3$$

Considerar los términos acumulativos en los balances de materia y energía da como resultado que estos queden expresados como ecuaciones diferenciales. Es por eso que para facilitar la creación y comprensión del modelo dinámico de un proceso, la ecuación diferencial se suele transformar al dominio que mas convenga.

Con la finalidad de comprender mejor lo mencionado anteriormente a continuación se presentara un ejemplo^[12]:

Un fluido A entra a un tanque en el cual es calentado mediante un serpentín dentro del cual circula un fluido caliente B, mientras que un agitador promueve el contacto entre el fluido y el sistema de calentamiento (ver Figura 12). El objetivo es crear un modelo que describa el comportamiento dinámico de la temperatura de salida del fluido.



Para facilitar los balances se considera sólo el sistema enmarcado por la línea gruesa, es decir las corrientes parte del sistema de calentamiento serán descartadas.

Balance de materia:

$$\frac{dM_{\text{sis}}}{dt} = \sum_{i=1}^{i=n} M_i^E - \sum_{i=1}^{i=n} M_i^S \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.4}$$

Considerando que no hay acumulación se tiene que:

$$0 = M_1 - M_2 \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.5}$$

Donde "M" representa el flujo másico de cada corriente ya sea a la entrada o la salida según el subíndice.

El flujo másico se determina a partir del flujo volumétrico "F" y la densidad de la corriente "ρ".

$$M_i = \rho F_i \dots \dots \dots ec. 1.4.6$$

Considerando que la densidad es constante a pesar del cambio en la temperatura, entonces en balance de materia es:

$$\rho F_1 = \rho F_2 \dots \dots \dots ec. 1.4.7$$

$$F_1 = F_2 \dots \dots \dots ec. 1.4.8$$

Balance de energía:

$$\frac{dH_{sis}}{dt} = h_1 M_1 - h_2 M_2 + Q \dots \dots \dots ec. 1.4.9$$

En donde "H" representa la entalpia del sistema como energía por unidad de masa, mientras que "h" se define de la siguiente forma:

$$h_i = C_p T_i \dots \dots \dots ec. 1.4.10$$

En donde "Cp" es el calor específico del fluido en unidades de energía por unidad de masa por unidad de temperatura. "Q" se refiere al calor intercambiado mediante el serpentín.

Tomando en cuenta lo anterior y considerando el balance de materia, entonces se puede expresar el balance de energía como:

$$\frac{dC_p T_{\text{sis}} \rho V_{\text{sis}}}{dt} = C_p T_1 \rho F_1 - C_p T_2 \rho F_2 + Q \dots \dots \dots ec. 1.4.11$$

En la ecuación anterior "V_{sis}" es el volumen del sistema. Si se considera que la agitación es perfecta podemos suponer que la temperatura del sistema "T_{sis}" es igual a la temperatura del fluido a la salida "T₂". Así tenemos:

$$V_{\text{sis}} \frac{dT_2}{dt} = T_1 F_1 - T_2 F_2 + \frac{Q}{\rho C_p} \dots \dots \dots ec. 1.4.12$$

Agrupando "T₂" de un solo lado de la ecuación tenemos:

$$\frac{V_{\text{sis}}}{F_2} \frac{dT_2}{dt} + T_2 = \frac{F_1}{F_2} T_1 + \frac{Q}{F_2 \rho C_p} \dots \dots \dots ec. 1.4.13$$

La ecuación anterior es el modelo que describe el comportamiento dinámico de la temperatura de salida del fluido. En ella se encuentra la característica dinámica del modelo en forma de la constante tiempo definida para este caso como:

$$\text{Constante tiempo} = \tau = \frac{V_{\text{sis}}}{F_2} \dots \dots \dots ec. 1.4.14$$

La sensibilidad del modelo con respecto a las variables de entrada, en este caso la temperatura de la alimentación "T₁" y la energía intercambiada con el serpentín "Q", está definida por las ganancias las cuales son:

Para "T₁":

$$\text{Ganacia} = K_1 = \frac{F_1}{F_2} \dots \dots \dots ec. 1.4.15$$

Para "Q":

$$\text{Ganacia} = K_2 = \frac{1}{C_p F_2 \rho} \dots \dots \dots ec. 1.4.16$$

Tomando en cuenta lo anterior, el modelo del comportamiento dinámico de la temperatura de salida del fluido puede escribirse como:

$$\tau \frac{dT_2}{dt} + T_2 = K_1 T_1 + K_2 Q \dots \dots \dots ec. 1.4.17$$

La ecuación anterior se expresa en variables de desviación restándole el balance de energía en estado estacionario:

$$\begin{aligned} & \tau \frac{dT_2}{dt} + T_2 = K_1 T_1 + K_2 Q \\ & - \left\{ \tau \frac{dT_{20}}{dt} + T_{20} = K_1 T_{10} + K_2 Q_0 \right\} \\ \hline & \tau \frac{dT_2'}{dt} + T_2' = K_1 T_1' + K_2 Q' \quad \dots \dots \dots ec. 1.4.18 \end{aligned}$$

Si se aplica la transformada de Laplace a la ecuación expresada en variables de desviación tenemos que:

$$L \left[\tau \frac{dT_2'}{dt} + T_2' = K_1 T_1' + K_2 Q' \right] \Rightarrow \tau \bar{T}_2 s + \bar{T}_2 = K_1 \bar{T}_1 + K_2 \bar{Q} \dots \dots \dots ec. 1.4.19$$

Acomodando los términos de la ecuación anterior:

$$\bar{T}_2(\tau s + 1) = K_1 \bar{T}_1 + K_2 \bar{Q} \Rightarrow \bar{T}_2 = \frac{K_1}{(\tau s + 1)} \bar{T}_1 + \frac{K_2}{(\tau s + 1)} \bar{Q} \dots \dots \dots ec. 1.4.20$$

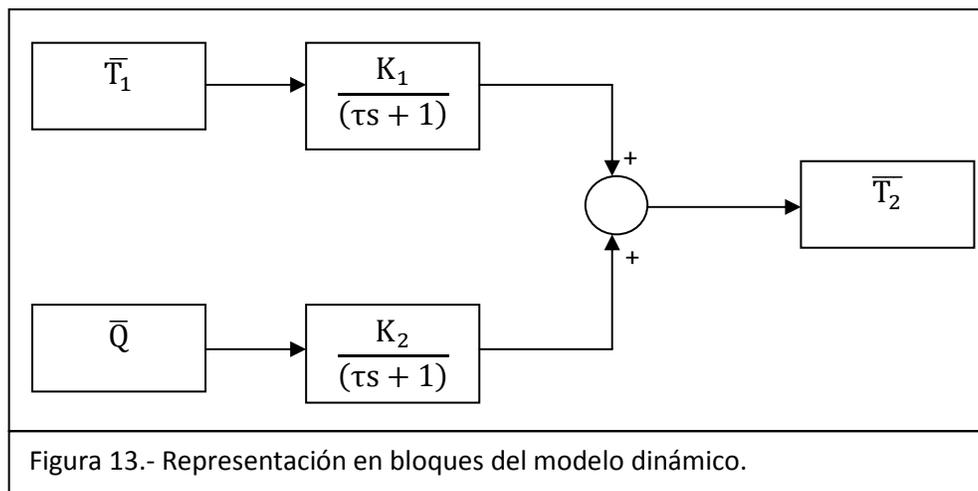
El efecto que provoca un cambio en la temperatura de entrada "T₁" sobre la temperatura de salida "T₂" está definido por:

$$\frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_1} = \frac{K_1}{(\tau s + 1)} \Rightarrow \text{Funcion de Transferencia } G_{p1} \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.21}$$

Mientras que el efecto de un cambio en la cantidad de energía que se intercambia con el serpentín "Q" está definido por:

$$\frac{\bar{T}_2}{\bar{Q}} = \frac{K_2}{(\tau s + 1)} \Rightarrow \text{Funcion de Transferencia } G_{p2} \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.22}$$

El modelo también puede ser representado en forma de bloques del siguiente modo:



Las funciones de transferencia son funciones que caracterizan la relación que existe entre las variables de entrada y las variables de salida en un proceso.

Las funciones de transferencia pueden ser de diferentes órdenes dependiendo de las características del proceso, en las secciones siguientes se procede a dar una explicación del comportamiento dinámico de los procesos según el orden de la función de transferencia.

1.4.1 Comportamiento dinámico de sistemas de primer orden^[11]

Un sistema de primer orden es aquél cuya salida $y(t)$ es modelada por una ecuación diferencial de primer orden como la mostrada a continuación:

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b f(t) \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.1.1}$$

En donde $f(t)$ es la entrada. Si " a_0 " $\neq 0$, la ecuación 1.4.1.1 se puede expresar como:

$$\frac{a_1}{a_0} \frac{dy}{dt} + y = \frac{b}{a_0} f(t) \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.1.2}$$

De esta manera la ganancia y la constante tiempo quedan definidas como:

$$\text{Constante tiempo} \Rightarrow \tau_p = \frac{a_1}{a_0} \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.1.3}$$

$$\text{Ganancia} \Rightarrow K_p = \frac{b}{a_0} \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.1.4}$$

Sustituyendo las ecuaciones 1.4.1.3 y 1.4.1.4 en 1.4.1.1 se tiene:

$$\tau_p \frac{dy}{dt} + y = K_p f(t) \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.1.5}$$

En el caso de que $y(t)$ y $f(t)$ estén definidas en términos de variables de desviación, las condiciones iniciales son: $y(0)=0$ y $f(0)=0$.

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación 1.4.1.5 se tiene que la función de transferencia está dada por:

$$G(s) = \frac{\bar{y}(s)}{\bar{f}(s)} = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.1.6}$$

Un proceso de primer orden con una función de transferencia como la ecuación 1.4.1.6 también es nombrado "retardo de primer orden".

Si en la ecuación 1.4.1.1 el valor de "a₀" es cero, entonces la ecuación queda:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{b}{a_1} f(t) = K'_p f(t) \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.1.7}$$

De esta ecuación obtenemos que la función de transferencia es:

$$G(s) = \frac{\bar{y}(s)}{\bar{f}(s)} = \frac{K'_p}{s} \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.1.8}$$

Si el proceso tiene una función de transferencia como la ecuación 1.4.1.8 es llamado "capacitancia pura" o "integrador puro".

Los procesos de primer orden se caracterizan por su capacidad para almacenar materia, energía o momentum y la resistencia asociada al flujo de masa, energía o momentum. En otras palabras, un proceso que tiene la capacidad de almacenar materia o energía y que actúa como un "amortiguador" (buffer) entre las corrientes de entrada y de salida se modela como un sistema de primer orden.

Para visualizar la respuesta dinámica de un proceso cuya función de transferencia es del tipo "capacitancia pura", se examina cómo es el cambio de $y(t)$ con el tiempo cuando $f(t)$ se somete a un cambio del tipo escalón unitario.

Ese cambio en $f(t)$ se expresa en el dominio de la transformada de Laplace como:

$$\bar{f}(s) = \frac{1}{s} \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.1.9}$$

Aplicando lo anterior en la ecuación 1.4.1.8 tenemos:

$$\bar{y}(s) = \frac{\bar{f}(s)K'_p}{s} = \frac{K'_p}{s^2} \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.1.10}$$

Aplicando la antitransformada de Laplace a la ecuación anterior:

$$y(t) = K'_p t \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.1.11}$$

Con la ecuación anterior es posible notar que la salida crece linealmente con el tiempo hasta el infinito (ver Figura 14).

En los procesos cuya función de transferencia es del tipo "retardo de primer orden" la respuesta dinámica es muy diferente, se considera también para este análisis un cambio del tipo escalón unitario en $f(t)$. Con esto la ecuación 1.4.1.6 queda:

$$\bar{y} = \frac{K_p}{s(\tau_p s + 1)} = \frac{K_p}{s} - \frac{K_p \tau_p}{\tau_p s + 1} \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.1.12}$$

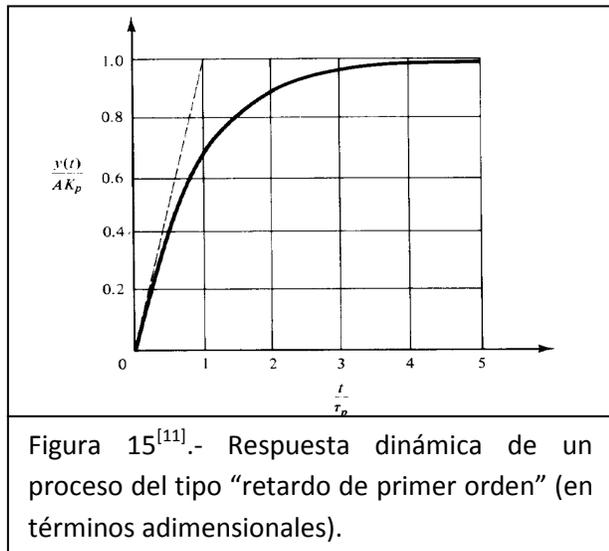
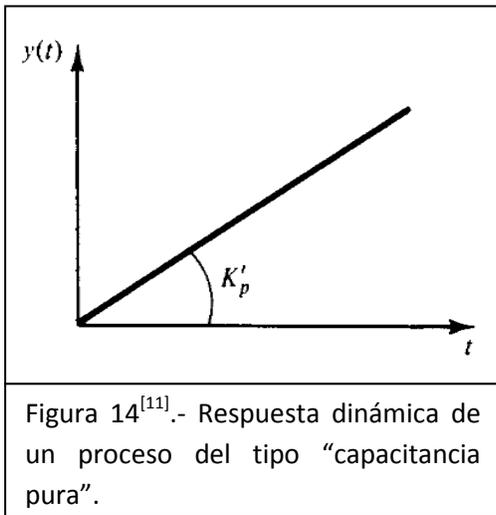
Aplicando la antitransformada tenemos:

$$y(t) = K_p \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}} \right) \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.1.13}$$

Si consideramos que el cambio en $f(t)$ fuese de cualquier magnitud A , la respuesta en $y(t)$ sería:

$$y(t) = AK_p \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}} \right) \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.1.14}$$

Al visualizar la ecuación anterior en una gráfica (ver figura 15) se observa que los procesos con función de transferencia del tipo “retardo de primer orden” son autoregulados, lo cual quiere decir que el proceso siempre alcanza un nuevo estado estacionario.



1.4.2 Comportamiento dinámico de sistemas de segundo orden^[11]

Un sistema de segundo orden es aquel cuya salida $y(t)$ se describe mediante la solución de una ecuación diferencial de segundo orden, como la siguiente:

$$a_2 \frac{d^2y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0y = bf(t) \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.2.1}$$

Si $a_0 \neq 0$ entonces podemos escribir la ecuación 1.4.2.1 como:

$$\tau^2 \frac{d^2y}{dt^2} + 2\xi\tau \frac{dy}{dt} + y = K_p f(t) \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.2.2}$$

En donde:

$$\tau^2 = \frac{a_2}{a_0} \qquad 2\xi\tau = \frac{a_1}{a_0} \qquad K_p = \frac{b}{a_0}$$

La ecuación 1.4.2.2 es la forma típica de un sistema de segundo orden en donde " τ " representa el periodo natural de oscilación del sistema, " ξ " es el factor de amortiguamiento y " K_p " es la ganancia.

Expresando la ecuación 1.4.2.2 en términos de variables de desviación y aplicando la transformada de Laplace se tiene que la función de transferencia típica para un sistema de segundo orden es:

$$G(s) = \frac{\bar{y}(s)}{\bar{f}(s)} = \frac{K_p}{\tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1} \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.2.3}$$

Los sistemas con dinámica de segundo orden (o superior) pueden provenir de diferentes situaciones físicas las cuales están clasificadas en tres categorías:

- a) Procesos de múltiples capacitancias: Son aquellos que consisten de dos o más capacitancias (sistemas de primer orden) en serie, a través de las cuales fluye materia, energía o momentum.
- b) Sistemas naturales de segundo orden: Son muy raros en procesos químicos, están asociados con el movimiento de líquidos o a la translación mecánica de partes sólidas lo que genera inercia, resistencia a esta o una capacitancia que almacena energía mecánica.
- c) Sistemas de procesamiento con control: En estos casos el control instalado en una unidad de proceso, introduce una dinámica adicional que al acoplarse con la dinámica del proceso incrementa el orden del comportamiento dinámico inicial.

La gran mayoría de sistemas de segundo orden encontrados en plantas químicas provienen de múltiples capacitancias o del efecto de los sistemas de control.

Para visualizar la repuesta dinámica de un proceso cuya función de transferencia es un sistema de segundo orden, se examina como es el cambio de $y(t)$ con el tiempo cuando $f(t)$ se somete a un cambio del tipo escalón unitario. Con esto la ecuación 1.4.2.3 queda:

$$y(s) = \frac{K_p}{s(\tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1)} \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.2.4}$$

Los polos de la función de transferencia de segundo orden están dados por las raíces del polinomio característico:

$$\tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1 = 0$$

Y son:

$$p_1 = -\frac{\xi}{\tau} + \frac{\sqrt{\xi^2 - 1}}{\tau} \quad p_2 = -\frac{\xi}{\tau} - \frac{\sqrt{\xi^2 - 1}}{\tau} \quad \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.2.5}$$

Con esto la ecuación 1.4.2.4 puede expresarse como:

$$y(s) = \frac{K_p/\tau^2}{s(s - p_1)(s - p_2)} \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.2.6}$$

La respuesta en $y(s)$ depende de la posición de los polos en el plano complejo, existiendo tres casos:

Caso A: Factor de amortiguamiento mayor a 1 \Rightarrow dos polos reales distintos.

Caso B: Factor de amortiguamiento igual a 1 \Rightarrow dos polos iguales

Caso C: Factor de amortiguamiento menor a 1 \Rightarrow dos polos complejos conjugados.

A continuación se examina cada caso por separado.

Caso A: Respuesta Sobreamortiguada ($\xi > 1$)

En este caso la antitransformada de la ecuación 1.4.2.6 por expansión en fracciones parciales es:

$$y(t) = K_p \left[1 - e^{-\frac{\xi t}{\tau}} \left(\cosh \sqrt{\xi^2 - 1} \frac{t}{\tau} + \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 - 1}} \sinh \sqrt{\xi^2 - 1} \frac{t}{\tau} \right) \right] \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.2.7}$$

La respuesta se muestra en la Figura 16 para varios valores del factor de amortiguamiento. Cuando se observa la figura podemos notar que el sistema tarda en responder además de que la respuesta es lenta comparado con un sistema de primer orden, la respuesta se vuelve más lenta cuando el factor de amortiguamiento aumenta y finalmente se nota que la respuesta se acerca a su valor final de manera asintótica.

Caso B: Respuesta Críticamente amortiguada ($\xi = 1$)

En este caso la antitransformada de la ecuación 1.4.2.6 es:

$$y(t) = K_p \left[1 - \left(1 + \frac{t}{\tau} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.2.8}$$

La respuesta de este caso también se muestra en la figura 18. Podemos notar que un sistema de segundo orden críticamente amortiguado se acerca a su valor final más rápido que un sistema sobreamortiguado.

Caso C: Respuesta Subamortiguada ($\xi < 1$)

La anti transformada de la ecuación 1.4.2.6 para este caso es:

$$y(t) = K_p \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\frac{\xi t}{\tau}} \text{sen}(wt + \phi) \right] \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.2.9}$$

En donde:

$$w = \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\tau} \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.2.10}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi} \right] \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.2.11}$$

La respuesta se muestra en la figura 17 para varios valores del factor de amortiguamiento, ahí se nota que: la respuesta subamortiguada es inicialmente más rápida que las otras, es oscilante con un decrecimiento progresivo de la amplitud y que el comportamiento se vuelve más oscilatorio con valores pequeños del factor de amortiguamiento.

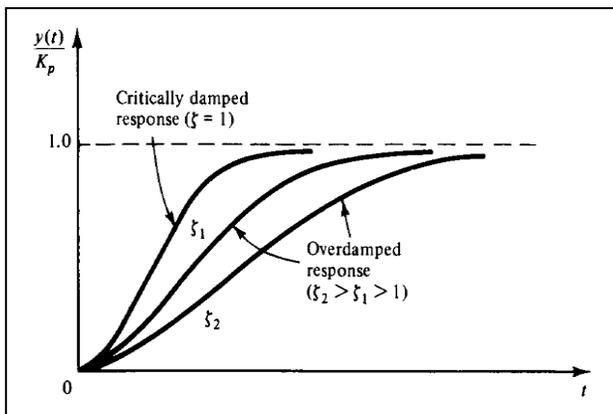


Figura 16^[11].- Respuesta sobreamortiguada y críticamente amortiguada.

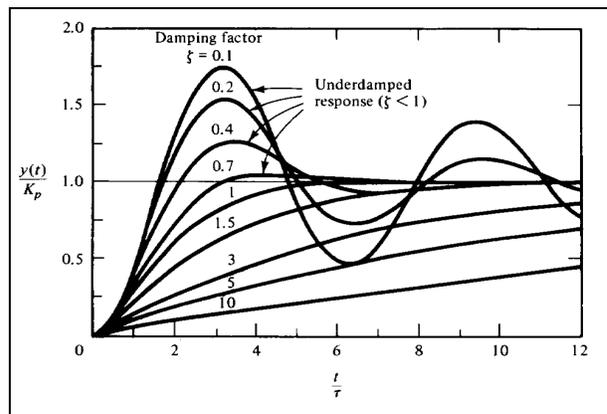


Figura 17^[11].- Respuesta subamortiguada.

1.4.3 Comportamiento dinámico de sistemas de orden superior^[11]

Los sistemas con dinámica mayor al segundo orden son usuales en procesos químicos. Hay tres tipos de sistemas de orden superior regularmente encontrados:

1.- N capacitancias en serie:

Las capacitancias en serie elevan el orden del sistema. Si tenemos un proceso de N capacitancias en serie, se observa que el orden del sistema es N, esto quiere decir que el polinomio característico de la función de transferencia es un polinomio de orden N. Para este tipo de sistemas la función de transferencia está dada por la siguiente ecuación:

$$G(s) = G_1(s)G_2(s) \dots G_N(s) = \frac{K_1 K_2 \dots K_N}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1) \dots (\tau_N s + 1)} \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.3.1}$$

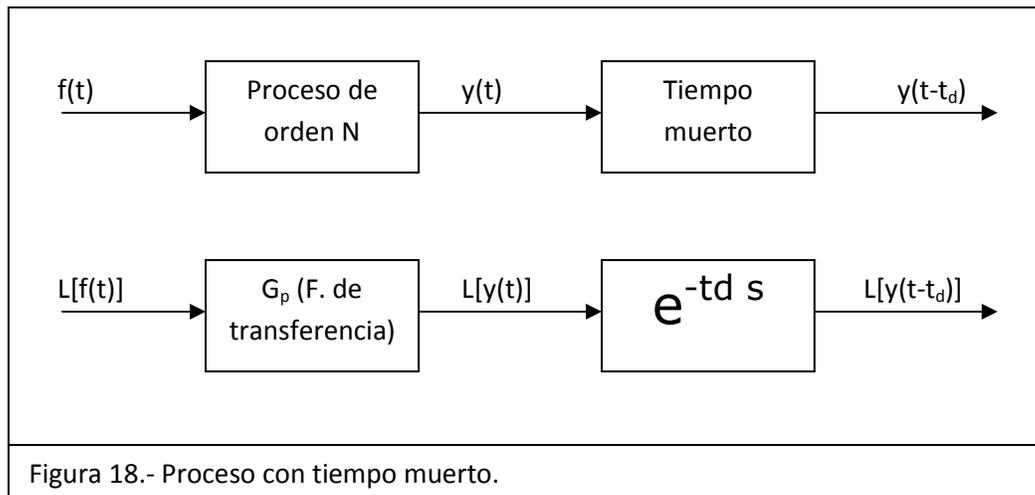
El comportamiento de sistemas de este tipo muestra que la respuesta tiene las características de un sistema sobreamortiguado. Lo que implica que cuando el número de capacitancias en serie aumenta la lentitud de la respuesta incrementa.

2.- Sistemas dinámicos con tiempo muerto:

En las secciones anteriores se consideró que un cambio en la variable de entrada tiene un efecto instantáneo en la variable de salida. Sin embargo

esto es falso ya que prácticamente todos los procesos presentan un retardo entre las salidas y las entradas.

Considerando un sistema de cualquier orden el cual presenta un tiempo muerto "t_d" entre la entrada y la salida, se puede representar dicho sistema como se muestra en la Figura 18.



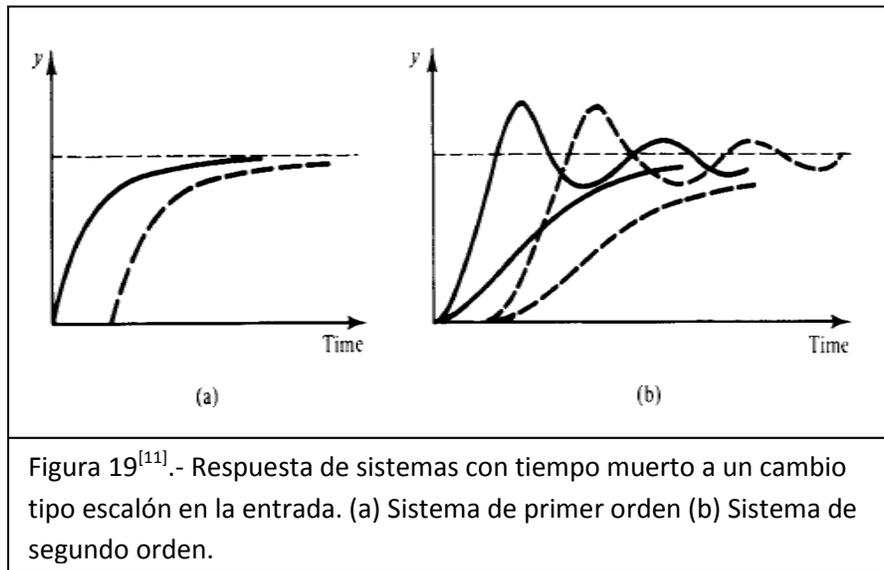
El tiempo muerto en el dominio de la transformada de Laplace se expresa como:

$$\frac{L[y(t - t_d)]}{L[y(t)]} = e^{-t_d s} \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.3.1}$$

De este modo, la función de transferencia entre las entradas y la salida considerando un atraso está dado por:

$$\frac{L[y(t - t_d)]}{L[f(t)]} = G_p e^{-t_d s} \dots \dots \dots \text{ec. 1.4.3.2}$$

La Figura 19 muestra la respuesta de un sistema de primer orden y uno de segundo orden, ambos con tiempo muerto para un cambio tipo escalón en la entrada.



Es muy común aproximar el término exponencial del tiempo muerto mediante las siguientes ecuaciones conocidas como aproximaciones de Padé.

$$e^{-t_d s} \approx \frac{1 - \frac{t_d}{2}s}{1 + \frac{t_d}{2}s} \quad \text{Aproximación de primer orden ec. 1.4.3.3a}$$

$$e^{-t_d s} \approx \frac{t_d^2 s^2 - 6t_d s + 12}{t_d^2 s^2 + 6t_d s + 12} \quad \text{Aproximación de segundo orden ec. 1.4.3.3b}$$

3.- Sistemas dinámicos con respuesta inversa:

El comportamiento dinámico de algunos procesos es algunas veces muy lejano de lo que se espera. Los sistemas cuyo comportamiento muestra que

la respuesta inicial es en dirección opuesta a la respuesta final alcanzada, son conocidos como sistemas de respuesta inversa.

La respuesta inversa es el resultado de dos efectos opuestos. En todos los casos en los que el comportamiento del sistema es una respuesta inversa, las raíces del numerador de la función de transferencia llamadas "ceros" tienen una parte real positiva.

En la figura 20 se muestran dos ejemplos del comportamiento dinámico de la respuesta inversa a un cambio del tipo escalón en la entrada.

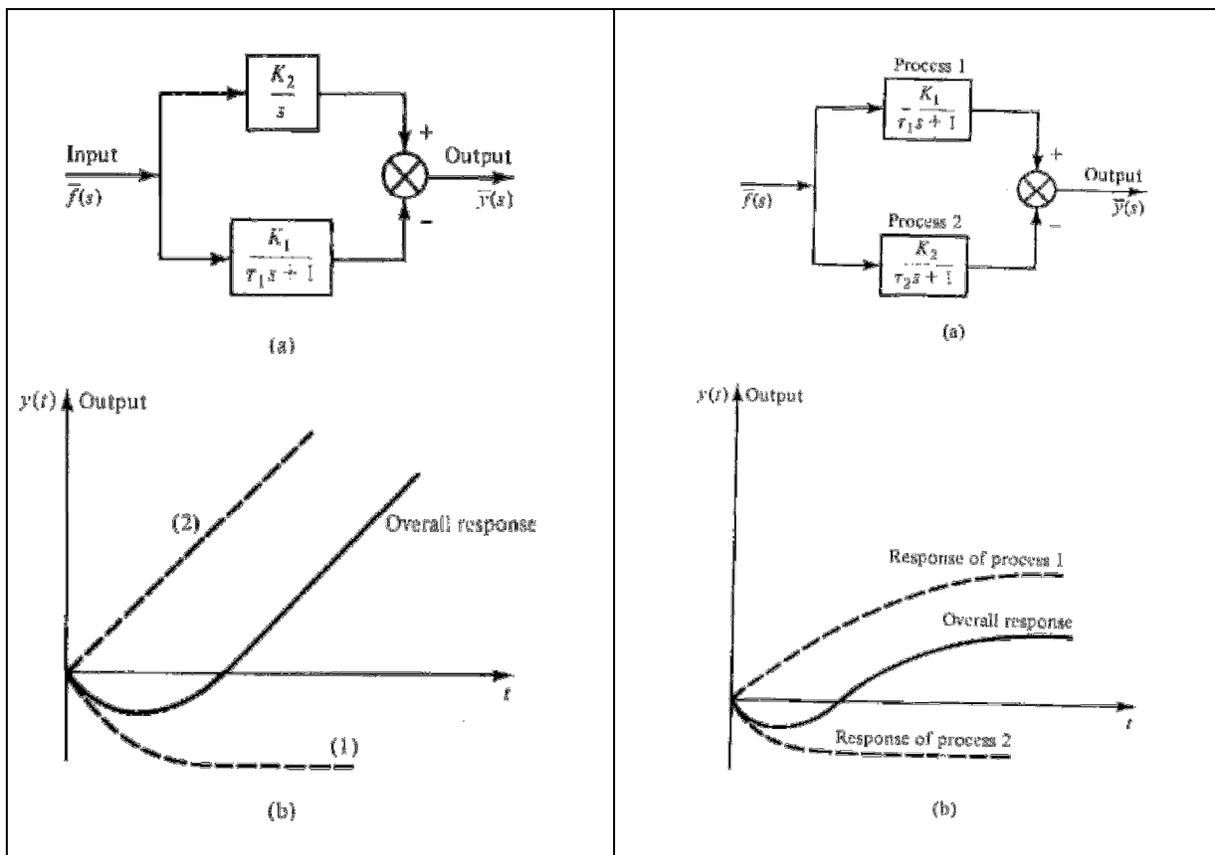


Figura 20⁽ⁱⁱⁱ⁾. - Del lado izquierdo en la figura (b) se representa la respuesta inversa entre una capacitancia pura y un sistema de primer orden y del lado derecho en la figura (b) la respuesta inversa entre dos sistemas de primer orden.

En la siguiente tabla se enlistan las funciones de transferencia para algunos casos de respuesta inversa.

Tabla 3.- Funciones de transferencia para sistemas con respuesta inversa.	
Capacitancia pura menos primer orden	$G(s) = \frac{K_2}{s} - \frac{K_1}{\tau_1 s + 1}$
Primer orden menos primer orden	$G(s) = \frac{K_1}{\tau_1 s + 1} - \frac{K_2}{\tau_2 s + 1}$
Segundo orden menos primer orden	$G(s) = \frac{K_1}{\tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1} - \frac{K_2}{\tau_2 s + 1}$
Segundo orden menos segundo orden	$G(s) = \frac{K_1}{\tau_1^2 s^2 + 2\xi_1\tau_1 s + 1} - \frac{K_2}{\tau_2^2 s^2 + 2\xi_2\tau_2 s + 1}$

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

2.1 Descripción del equipo: Columna de absorción PIGNAT

El equipo de absorción de gases PIGNAT que se encuentra montado en el Laboratorio de Ingeniería Química (LIQ) de la Facultad de Química de la UNAM, está compuesto por una columna de absorción de vidrio de 0.0508 m de diámetro interno y 1.2 m de altura, está rellena de empaques tipo anillos Raschig de 0.434 cm de diámetro interno, 0.622 cm de diámetro externo y 0.78 cm de longitud, que aportan una superficie de contacto de $813.5 \text{ m}^2/\text{m}^3$. La altura empacada es de 1.06 m. Dentro de la columna hay 5 soportes redistribuidores de líquido sobre los cuales están acopladas válvulas para tomar muestras (V9a-V9e) y transmisores de temperatura (TT-302 – TT-306) acoplados al sistema de medición y control distribuido del LIQ. Consultar el diagrama de tubería e instrumentación ubicado en el anexo 1.

El líquido que es alimentado a la columna se almacena en un recipiente de plástico de 20L y la alimentación se hace mediante una bomba de tipo dosificadora cuyos controles permiten establecer el flujo. Sobre la línea de alimentación de líquido se encuentra instalado un rotámetro que indica el flujo en L/h (FI-1) y un transmisor de temperatura (TT-301) acoplado al sistema de medición y control distribuido del LIQ para identificar la temperatura de alimentación.

El gas que se alimenta a la columna puede ser aire u otro gas o una mezcla de ambos. El aire alimentado proviene de la red de aire comprimido del LIQ. Sobre la línea de aire está instalado un indicador de presión (PI-1), una válvula que funciona como purga (V1') para eliminar la acumulación de agua condensada en la línea y después otra válvula (V1); seguido de esto está instalada una válvula manual (V2) y un indicador para controlar la presión (PI-2) de alimentación al equipo, después está instalada una válvula (V3) para controlar manualmente el flujo de alimentación; finalmente, antes de que la línea se conecte al tubo de alimentación en el fondo de la columna está instalado un rotámetro que indica el flujo (FI-2) como un porcentaje (en las secciones siguientes se explica cómo determinar el flujo de aire en m^3/h a partir de la lectura en el rotámetro). El otro gas (dióxido de carbono) se encuentra almacenado en un tanque cilíndrico de alta presión cercano al equipo, el tanque tiene un indicador de presión (PI-3) [psi], a la salida del tanque se encuentra instalada una válvula manual (V4) y un indicador para controlar la presión (PI-4) de alimentación al equipo, después están instaladas dos válvulas en serie (V6 y V5) seguidas de otra que funciona como purga (V6') para eliminar el gas que se queda en la tubería una vez terminada la operación del equipo, después está instalada una válvula (V7) para controlar el flujo de alimentación mediante un rotámetro que indica el flujo (FI-3) como una lectura en mm (en las secciones siguientes se explica cómo determinar el flujo de aire en m^3/h a partir de la lectura en el

rotámetro). Ambas líneas se juntan en una sola sobre la cual está instalada una válvula para tomar muestras (V8) de la mezcla gaseosa de alimentación y un transmisor de temperatura (TT-307) acoplado al sistema de medición y control distribuido del LIQ para identificar la temperatura de alimentación.

Los fluidos pasan a contracorriente dentro de la columna en la cual también está instalado un indicador transmisor de la caída de presión (PDIT-301). En el fondo de la columna, por debajo de la alimentación de gas, se forma una columna hidrostática de líquido con el fin de evitar que el gas se escape por el fondo. Hay una válvula (V10) instalada al final de la columna hidrostática para vaciarla una vez terminada la operación del equipo. El líquido fluye del fondo de la columna hidrostática a un depósito en el fondo del cual está instalada una válvula (V11) para recibir el líquido en un tanque de almacenamiento de plástico de 20L. El gas que sale por el domo de la columna pasa a una línea la cual se divide en dos. Por un lado está instalada una válvula (V12) que permite liberar el gas directamente al ambiente, por el otro está instalada una válvula (V13) que envía el gas a un depósito en el que el gas se burbujea en líquido absorbente para reducir la concentración del soluto. Este depósito se llena de manera manual, en el fondo tiene instalada una válvula (V14) para vaciar el líquido, el gas burbujeado sale libremente al ambiente.

2.2 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad consiste en revisar el efecto que tienen todas o algunas de las variables de entrada sobre todas o algunas de las variables de salida de un proceso existente. Esto se hace con el fin de crear un modelo dinámico empírico, a partir de datos experimentales, para la posterior colocación de mecanismos de control. Cuando el modelo teórico es muy complejo o cuando se quiere un modelo de la respuesta real de un equipo o proceso existente, es cuando se opta por el análisis de sensibilidad para la creación del modelo dinámico. El análisis de sensibilidad consiste en modificar o alterar alguna de las variables de entrada cuando el equipo o proceso está operando en estado estacionario para revisar cómo es el comportamiento dinámico de la respuesta en las variables de salida alcanzando un nuevo estado estacionario. Para lograr esto es necesario tener un registro del valor de la variable de salida desde que se perturbó el estado estacionario original hasta que se alcanzó el nuevo estado estacionario, este registro se conoce como "curva de reacción" o "curva de respuesta". A partir de la curva de respuesta se determinan los parámetros dinámicos necesarios (constante tiempo, ganancia y tiempo muerto) para crear un modelo que permita describir el comportamiento dinámico de las variables de salida.

2.2.1 Selección de las condiciones de estado estacionario

Como se menciona en el título de esta tesis, se estudió el comportamiento dinámico en una columna empacada para el proceso de absorción de CO₂ (bióxido de carbono) en MEA (mono-etanol-amina). Esto se realizó ocupando la columna de absorción empacada PIGNAT montada en el Laboratorio de Ingeniería Química previamente descrita en la sección 2.1 de este capítulo. La columna, que es usada para impartir la materia "Laboratorio de Ingeniería Química III", normalmente opera con los fluidos antes mencionados, es por eso que se seleccionaron estos para la realización del análisis de sensibilidad. Previo a definir las condiciones del estado estacionario del que partirá el análisis es necesario identificar las variables de entrada y de salida. En la Tabla 4 se muestra una lista de estas variables.

El estado estacionario elegido está definido por las siguientes variables de entrada:

Flujo de alimentación de aire: 20% en el rotámetro correspondiente.

Flujo de alimentación de CO₂: 30mm en el rotámetro correspondiente.

Composición del líquido absorbente: Solución de Mono Etanol Amina al 15% en masa.

Flujo de alimentación del líquido absorbente: 3 L/h.

Se establecieron esas condiciones de estado estacionario porque el análisis de sensibilidad puede ser algo tardado así que el consumo de reactivos no debe ser excesivo. Además de que son condiciones ya probadas en los protocolos experimentales establecidos para la materia "LIQ III".

Tabla 4.- Variables de entrada y de salida en la columna PIGNAT	
Variables de Entrada	Variables de Salida
Flujo de alimentación de CO ₂ .	Flujo del líquido absorbente.
Flujo de alimentación de aire.	Flujo de la mezcla gaseosa CO ₂ -Aire.
Flujo de alimentación de la mezcla líquida absorbente.	Composición de la mezcla gaseosa.
Composición de la mezcla líquida absorbente.	Composición del líquido absorbente.
Temperatura de alimentación de la mezcla gaseosa.	Temperatura de la mezcla gaseosa.
Temperatura de alimentación de la mezcla líquida absorbente.	Temperatura del líquido absorbente.
Composición de la mezcla gaseosa.	Temperatura en cada sección a lo largo de la columna.
	Composición en cada sección a lo largo de la columna.

2.2.2 Metodología del análisis

Para hacer al análisis de sensibilidad del proceso de absorción de CO₂ en una solución de MEA-agua en la columna empacada PIGNAT, se hicieron pasar los fluidos a contracorriente dentro de la columna. Se sabe que este proceso de absorción está acompañado por una reacción química en el seno de la fase líquida entre el CO₂ y la MEA la cual es exotérmica, lo que provoca que la columna se caliente, ocasionando un perfil de temperaturas.

Dadas las características del equipo sólo es posible tener un registro automático de la temperatura de alimentación de los fluidos y de las temperaturas en cada sección de la columna, esto gracias a los transmisores instalados en el equipo (TT-301 a TT-307).

Bajo estas circunstancias el análisis de sensibilidad consistió en estudiar el comportamiento dinámico de la temperatura a lo largo de la columna para perturbaciones de tipo escalón (cambio instantáneo) de diferentes magnitudes en las tres variables manipulables de la columna, es decir, los flujos de alimentación de aire-CO₂ y líquido absorbente MEA-agua. Para evitar el intercambio de calor entre la columna y el medio que la rodea, la columna fue aislada con material plástico.

La metodología experimental para obtener la curva de respuesta en la temperatura de cada sección de la columna fue la siguiente:

1. Se enciende la computadora principal del sistema de medición y control del LIQ.
2. Se conecta y enciende el módulo móvil del sistema de medición y control del LIQ.
3. En el módulo móvil se crea una gráfica para visualizar en tiempo real el valor de la temperatura en cada sección de la columna (estos pasos están mejor explicados en el anexo 2). Se recubre la columna con el material aislante.
4. Se comienza a alimentar la solución de MEA manteniendo cerradas las válvulas V9a a V9e y V10 y la V11 abierta para recibir el líquido en el recipiente a la salida de la columna.
5. Una vez que en la pantalla del módulo móvil se observa que la temperatura en cada sección es constante se procede a alimentar la mezcla gaseosa (pasos 6-8).
6. Se purga la línea de CO₂ con la válvula V6'. Se abre la válvula V4 hasta que el indicador PI-4 marca 40 psi. Se abren las válvulas V5 y V6.
7. Se revisa que haya servicio de aire comprimido en el indicador PI-1. Se purga la línea de aire con la válvula V1'. Se abre totalmente la válvula V1. Se abre la válvula V2 hasta que el indicador PI-2 marca 1 bar.

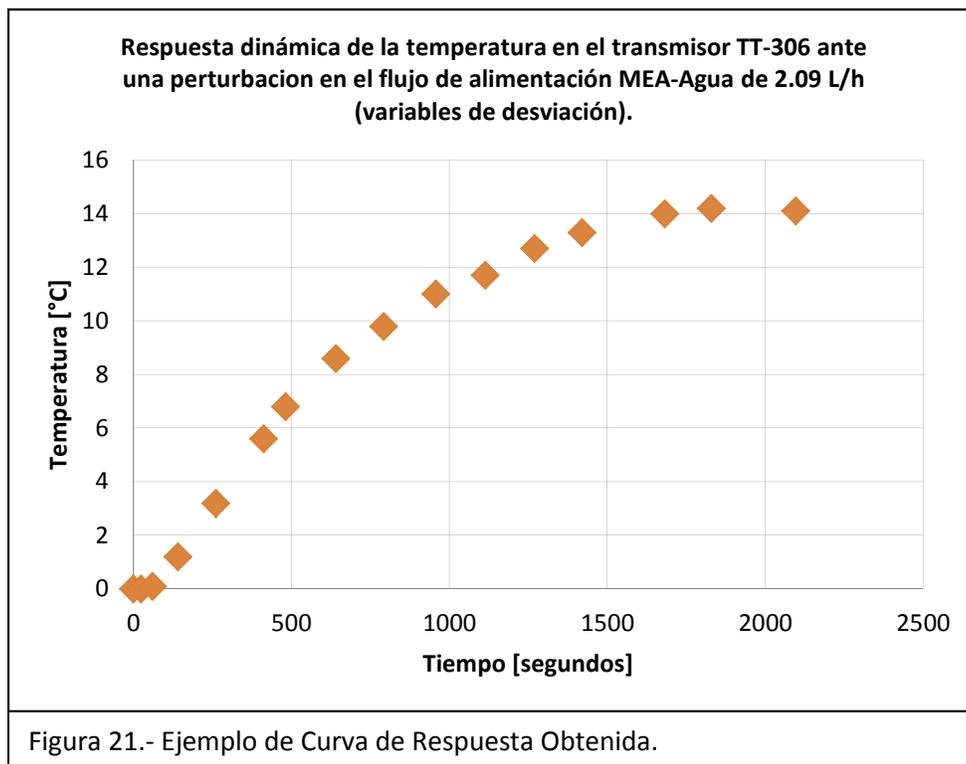
8. Se abre la válvula V3 hasta que el indicador FI-2 marca 20%. Se abre la válvula V7 hasta que el indicador FI-3 marca 30mm. Ambas operaciones deben hacerse al mismo tiempo.
9. Una vez que en la pantalla del módulo móvil se observa que la temperatura en cada sección alcanzó el estado estacionario (entre 40-60 min) se procede a modificar (perturbar) alguna de las variables de entrada.
10. Para realizar una perturbación en el flujo de alimentación de aire se abre la válvula V3 hasta un nuevo valor en el indicador FI-2. Si lo que se desea es perturbar el flujo de CO₂ se abre la válvula V7 hasta un nuevo valor en el indicador FI-3. Realizar una perturbación en el flujo de alimentación de la solución de MEA requiere instrucciones especiales del uso de la bomba, las cuales están indicadas en el anexo 3.
11. Una vez realizada la perturbación se espera a que en la pantalla del módulo móvil se observe que la temperatura en cada sección de la columna alcance un nuevo estado estacionario. Se capturan los datos de temperatura y tiempo de cada indicador y se procede al análisis de la curva de respuesta para proponer el modelo dinámico.
12. Con esto termina la experimentación para obtener la curva de respuesta de una perturbación en particular. Para evaluar otra

perturbación es necesario detener el equipo y esperar a que alcance la temperatura ambiental para repetir todo el procedimiento.

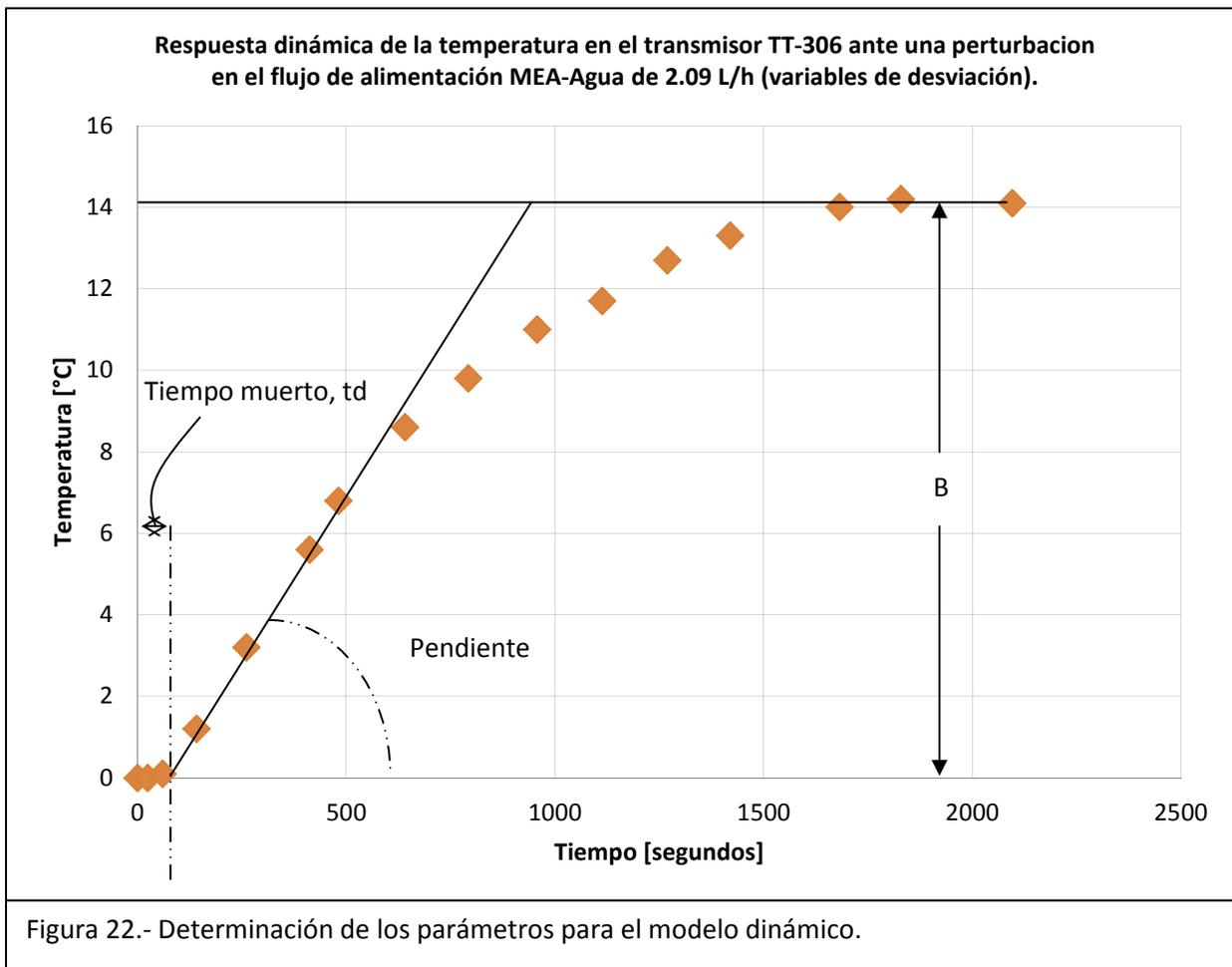
Una vez que se tuvieron las curvas de respuesta de todas las perturbaciones planteadas se procedió al análisis de éstas para determinar los parámetros del modelo dinámico que describe el efecto de cada perturbación sobre la temperatura en cada sección de la columna.

El análisis de las curvas de respuesta se realizó de la siguiente manera:

Con los datos de temperatura y tiempo para cada perturbación en cada sección de la columna se creó una gráfica de temperatura de desviación (se definió a las variables de desviación en la sección 1.4) vs. tiempo como la que se muestra a continuación:



De cada gráfica se obtuvo el valor de la ganancia, el tiempo muerto y un aproximado de la constante tiempo de la siguiente manera: Se dibuja una línea que pase sobre el punto de inflexión de la curva y otra horizontal sobre el valor en el nuevo estado estacionario como se muestra en la siguiente figura:



El valor de la ganancia se determina con la siguiente ecuación:

$$K_p = \frac{B}{\text{tamaño del escalón}} \dots \dots \dots ec. 2.2.1$$

El valor aproximado de la constante tiempo se obtiene con:

$$\tau_p = \frac{B}{\text{pendiente}} \dots \dots \dots ec. 2.2.2$$

El tiempo muerto se lee directamente de la gráfica.

Una vez obtenidos estos valores, se ocupan en las ecuaciones correspondientes a los modelos de primer y segundo órdenes (ec. 2.2.3, 2.2.4, 2.2.5) para revisar cuál es el que mejor describe el comportamiento. La constante tiempo obtenida de la gráfica es una primera aproximación, la que mejor describe el modelo se obtiene con el uso de la herramienta "SOLVER®" del programa "Microsoft Office Excel®".

Modelo de Primer Orden:

$$y(t - t_d) = AK_p \left(1 - e^{-\frac{t-t_d}{\tau_p}} \right) \dots \dots \dots ec. 2.2.3$$

Modelo de Segundo Orden Sobreamortiguado:

$$y(t - t_d) = AK_p \left[1 - e^{-\frac{\xi(t-t_d)}{\tau}} \left(\cosh \sqrt{\xi^2 - 1} \frac{(t - t_d)}{\tau} + \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 - 1}} \sinh \sqrt{\xi^2 - 1} \frac{(t - t_d)}{\tau} \right) \right]$$

.....ec. 2.2.4

Modelo de Segundo Orden Críticamente Amortiguado:

$$y(t - t_d) = AK_p \left[1 - \left(1 + \frac{(t - t_d)}{\tau} \right) e^{-\frac{(t - t_d)}{\tau}} \right] \dots \dots \dots ec. 2.2.5$$

En las ecuaciones anteriores el término "A" se refiere al tamaño del escalón, es decir, el tamaño de la perturbación sobre la variable de entrada. Las ecuaciones anteriores sólo aplican a partir de $t \geq t_d$ ya que de lo contrario el valor del tiempo sería negativo, lo cual es imposible. El efecto del tiempo muerto ésta detallado en la sección 1.4 de esta tesis.

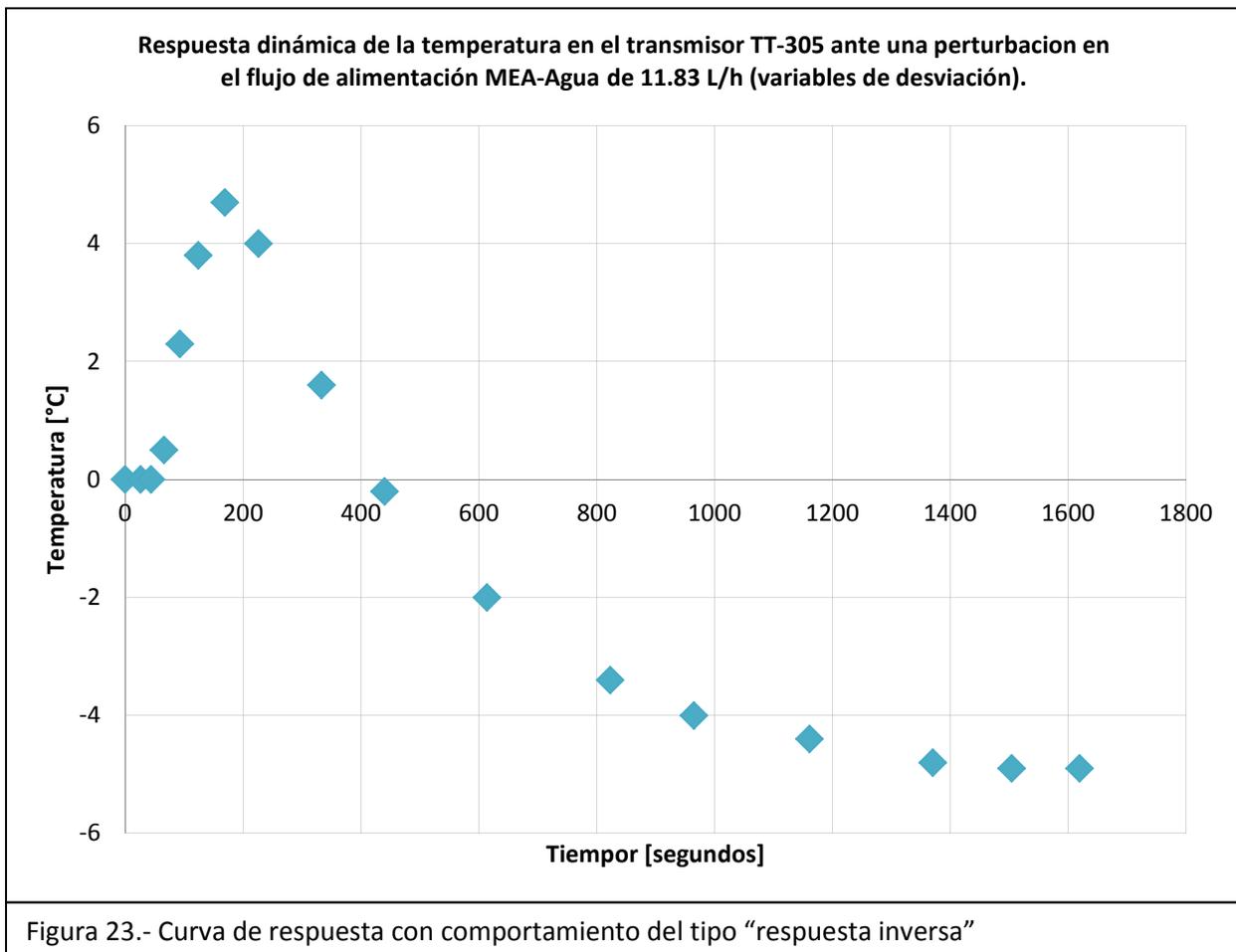
No se consideró para el análisis el modelo de segundo orden subamortiguado ya que ninguna de las respuestas encontradas tenía características oscilantes.

Una vez creado el modelo se procedió a comparar los resultados reales experimentales contra los que se obtienen con cada uno de los modelos antes mencionados. Para tener un valor más preciso de la constante tiempo y del factor de amortiguamiento (para el caso del modelo de segundo orden sobreamortiguado) se usó la herramienta "SOLVER®" del programa "Microsoft Office Excel®", siendo el objetivo de ésta obtener los valores que hacen que la "diferencia cuadrática" sea lo más pequeña posible. La "diferencia cuadrática" se definió como sigue:

$$diferencia\ cuadrática = \sum \left[\left(\begin{matrix} valor \\ real\ al \\ tiempo\ t \end{matrix} \right) - \left(\begin{matrix} valor \\ caculado \\ al\ tiempo\ t \end{matrix} \right) \right]^2 \dots \dots \dots ec. 2.2.6$$

Esto se realizó para los tres modelos que se escogieron para describir a la curva de respuesta. Se eligió como el más conveniente aquel cuyo valor de la "diferencia cuadrática" fuese el menor.

En el caso particular en el que la curva de respuesta presentara un comportamiento del tipo respuesta inversa (ver sección 1.4.3), como la que se muestra en la figura 23, el análisis se realizó de una manera diferente a la anterior.



Para estos casos sólo se consideró que la respuesta inversa era provocada por dos sistemas de primer orden en "competencia". La ecuación correspondiente al modelo de respuesta inversa que se usó es la siguiente:

$$y(t - t_d) = A \left[K_{p_1} \left(1 - e^{-\frac{t-t_d}{\tau_{p_1}}} \right) - K_{p_2} \left(1 - e^{-\frac{t-t_d}{\tau_{p_2}}} \right) \right] \dots \dots \dots \text{ec. 2.2.7}$$

Esta ecuación parte de aplicar la antitransformada de Laplace a la función de transferencia para una respuesta inversa ocasionada por un modelo de primer orden menos otro de primer orden mostrada en la Tabla 3 de la sección 1.4.3.

El valor del tiempo muerto se lee directamente de la gráfica como se indicó con anterioridad. El término "A" hace referencia al tamaño del escalón y la consideración sobre el tiempo muerto explicada en párrafos anteriores se debe aplicar también en este caso.

Para tener el valor de las constantes tiempo y de las ganancias se usó la herramienta "SOLVER®" del programa "Microsoft Office Excel®", siendo el objetivo de ésta obtener los valores que hacen que la "diferencia cuadrática" sea lo más pequeña posible. La "diferencia cuadrática" en este caso también está definida por la ecuación 2.2.6.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

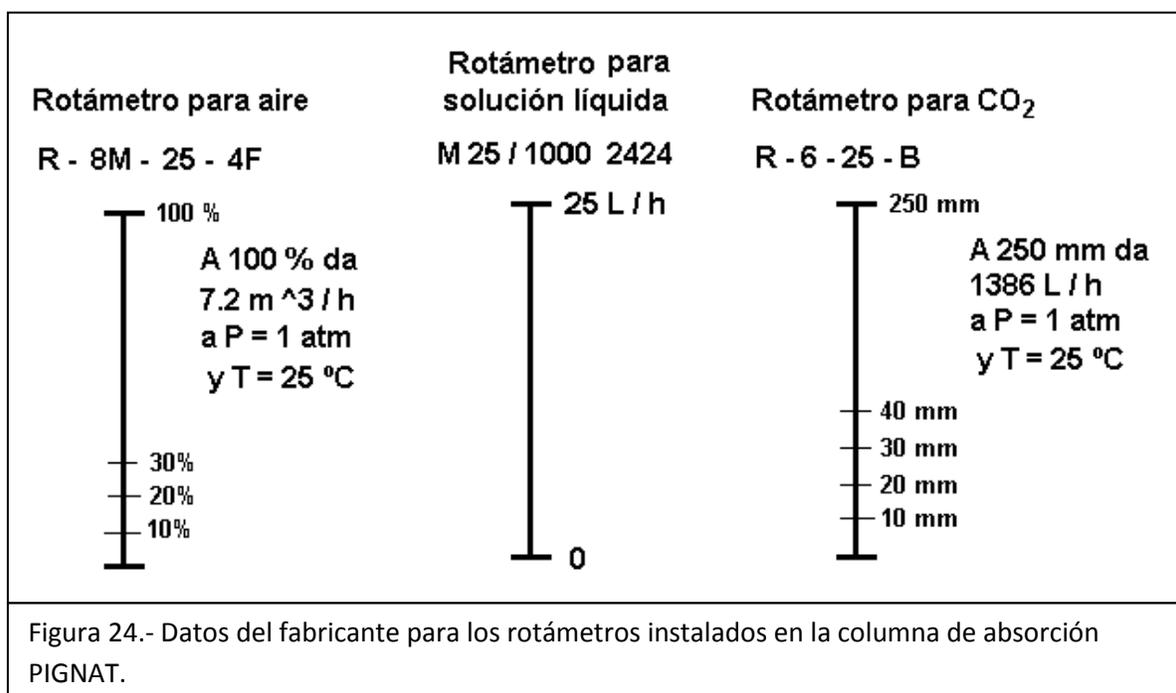
Como se mencionó en el capítulo anterior el estado estacionario del cual partió el análisis de sensibilidad está definido por las siguientes condiciones:

Flujo de Aire: 20% en el rotámetro.

Flujo de CO₂: 30mm en el rotámetro.

Flujo de MEA al 15% en peso: 3 L/h.

Los flujos de aire y CO₂ leídos en los rotámetros a condiciones estándar, se pueden pasar a condiciones ambientales del Laboratorio de Ingeniería Química planteando reglas de tres a partir de la siguiente información proporcionada por el fabricante y empleando las siguientes ecuaciones:



Las ecuaciones termodinámicas de transformación para el gasto volumétrico son:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \dots \dots \dots \text{ec. 2.3.1}$$

Dividiendo la ecuación anterior entre la variable tiempo se obtiene:

$$\frac{P_1 Q_1}{T_1} = \frac{P_2 Q_2}{T_2} \dots \dots \dots \text{ec. 2.3.2}$$

Sistematizando el procedimiento anterior se pueden deducir las siguientes ecuaciones:

Para el rotámetro de Aire:

$$\text{Flujo de Aire} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] = \frac{\frac{\text{lectura en el rotámetro} * 0.072 * 28.95}{22.4}}{(-0.0035 * \text{temp. de alim. del aire}) + 1.2791} \dots \dots \dots \text{ec. 2.3.3}$$

Para el rotámetro de CO₂:

$$\text{Flujo de CO}_2 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] = \frac{0.0144 * \text{lectura en el rotámetro}}{(-0.0053 * \text{temp. de alim. del CO}_2) + 1.9547} \dots \dots \dots \text{ec. 2.3.4}$$

En ambas ecuaciones la temperatura de alimentación debe introducirse en [°C].

Para revisar que el flujo de solución de MEA fuera el correcto, se tomaron muestras de volumen y tiempo a la salida para revisar el valor real del flujo.

Se revisó también que la concentración de MEA fuera la adecuada tomando tres muestras de 4 mL del tanque de alimentación y se titularon con HCl 1N, aplicando las siguientes ecuaciones:

$$V_1N_1 = V_2N_2 \dots \dots \dots \text{ec. 2.3.5}$$

En donde:

“V₁” es el volumen de ácido clorhídrico utilizado en la neutralización. Para observar el cambio de coloración se usaron 3 gotas de fenolftaleína en cada una de las muestras.

“V₂” es el volumen tomado de muestra de MEA.

“N₁” es la concentración utilizada de HCl.

“N₂” es la concentración de la muestra.

Para transformar la concentración de la muestra de MEA con unidades de normalidad a % en masa se aplicó la siguiente ecuación ajustada con valores experimentales:

$$\% \text{ masa} = 6.064 (N) + 0.0231 \dots \dots \dots \text{ec. 2.3.6}$$

Sistematizando el procedimiento anterior se puede proponer la siguiente ecuación para determinar el % en masa de la solución de MEA:

$$\text{MEA } [\% \text{ peso}] = \left(\frac{\text{ml gastados de HCl 1N}}{4} * 6.064 \right) + 0.0231 \dots \dots \dots \text{ec. 2.3.7}$$

Ya que los experimentos se realizaron en varios días y las condiciones de temperatura no fueron exactamente las mismas, además de que la solución de MEA-agua fue preparada cada día de experimentación, el estado estacionario original tuvo algunas muy pequeñas variaciones. En la Tabla 5 se muestran estas condiciones, así como el promedio y la desviación estándar entre los diferentes días de experimentación.

En la descripción del equipo realizada en la sección 2.1 se indica que el indicador TT-301 corresponde a la temperatura de alimentación de la solución de MEA, mientras que el TT-307 corresponde a la temperatura de alimentación de la mezcla de aire y CO₂.

Como podemos notar en la tabla 5, la desviación estándar que existe entre las condiciones de estado estacionario en los diferentes días de experimentación es a lo máximo de 3.3°C, lo cual permite comparar los resultados obtenidos entre las diferentes perturbaciones hechas durante el análisis de sensibilidad.

Tabla 5.- Estado estacionario original.									
Fecha	ml HCl 1N			% masa MEA	TT-302	TT-303	TT-304	TT-305	TT-306
06-Abr-11	10.400	10.300	10.400	15.739	37.300	43.400	27.000	38.000	23.000
19-May-11	10.300	10.400	10.300	15.688	42.600	44.400	30.500	37.800	22.600
23-May-11	10.700	10.100	10.400	15.790	35.300	40.200	27.400	36.000	23.300
24-May-11	10.400	10.200	10.400	15.688	32.900	39.600	27.200	36.400	23.400
25-May-11	10.300	10.400	10.300	15.688	35.800	43.200	29.400	38.000	23.900
26-May-11	10.800	10.300	10.100	15.790	36.600	41.500	29.500	36.300	23.900
30-May-11	10.600	10.600	10.700	16.143	35.300	43.200	31.500	38.400	24.300
31-May-11	10.600	10.400	10.600	15.992	30.300	39.500	30.100	36.600	23.600
Promedio				15.815	35.763	41.875	27.825	37.188	23.500
Desv. Est.				0.156	3.322	1.802	1.576	0.889	0.510
Fecha	TT-301	TT-307	Aire [m3/h]	CO2 [m3/h]	MEA [L/h]	Los datos de los indicadores TT-301 a TT-307 están expresados en [°C]			
06-Abr-11	24.000	25.300	1.563	0.237	2.870				
19-May-11	26.600	24.300	1.559	0.237	2.880				
23-May-11	26.800	26.100	1.567	0.238	2.860				
24-May-11	26.300	25.300	1.563	0.237	2.830				
25-May-11	24.800	24.100	1.558	0.236	2.880				
26-May-11	28.500	26.900	1.571	0.238	2.840				
30-May-11	26.500	24.700	1.560	0.237	2.720				
31-May-11	23.700	23.500	1.555	0.236	2.820				
Promedio	25.900	25.025	1.562	0.237	2.838				
Desv. Est.	1.510	1.039	0.005	0.001	0.049				

Hay que considerar además en la tabla anterior que la temperatura indicada por los sensores tiene cierta diferencia con la temperatura real; estas diferencias se determinaron comparando la temperatura indicada por cada sensor contra la indicada por un termómetro de mercurio. En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos así como la magnitud de esta diferencia, en donde:

$$\text{arreglo} = \left[\left(\left. \begin{array}{l} \text{Temperatura en} \\ \text{el termometro} \\ \text{de mercurio} \end{array} \right\} - \left. \begin{array}{l} \text{Temperatura} \\ \text{indicada en} \\ \text{el sensor} \end{array} \right\} \right]_{\text{promedio}} \dots \dots \dots \text{ec. 2.3.8}$$

T. Mercurio	TT-301	TT-302	TT-303	TT-304	TT-305	TT-306	TT-307
2.00	2.3	1.1	2	0	2.7	-0.7	1.9
11.00	11.1	9.9	10.8	8.2	11.3	7	10.9
18.00	18.3	16.4	17.3	15.6	18	14.9	17.6
Arreglo	-0.233	1.2	0.3	2.4	-0.3333	3.2667	0.2

De esta manera, el estado estacionario considerando la corrección es:

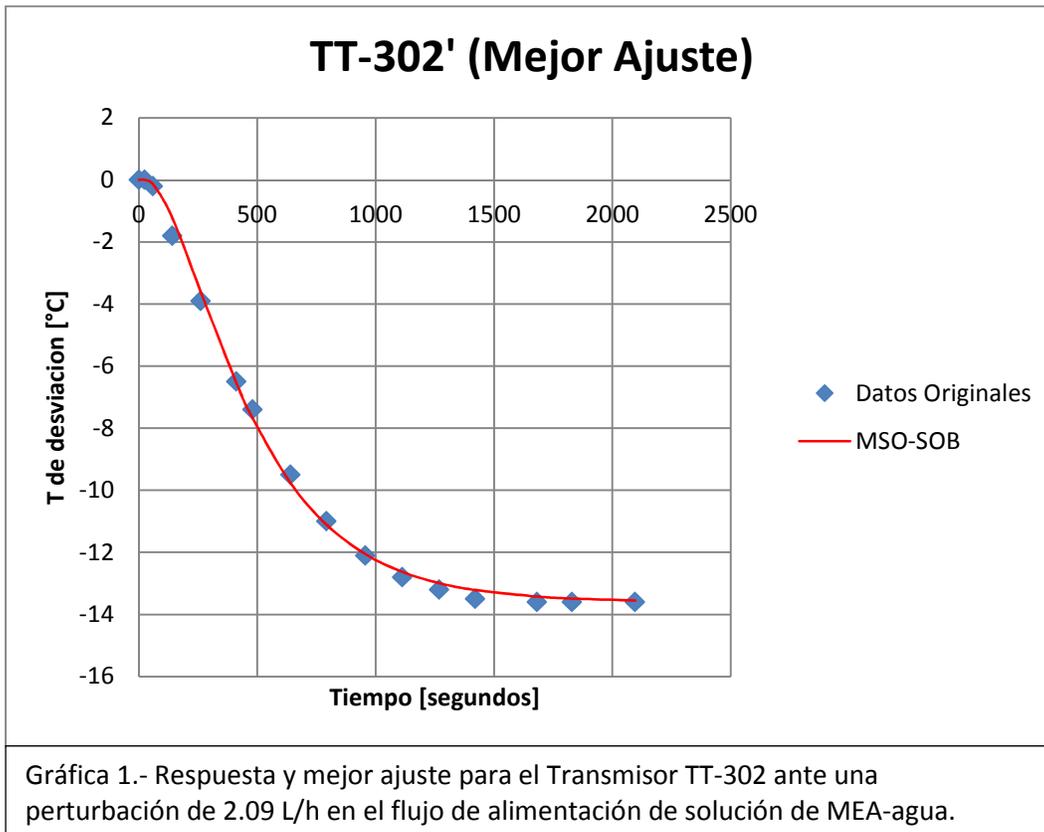
% masa MEA	TT-301	TT-302	TT-303	TT-304	TT-305	TT-306	TT-307	Aire [m3/h]	CO2 [m3/h]	MEA [L/h]
15.815	25.667	36.963	42.175	31.475	36.854	26.767	25.225	1.563	0.237	2.838

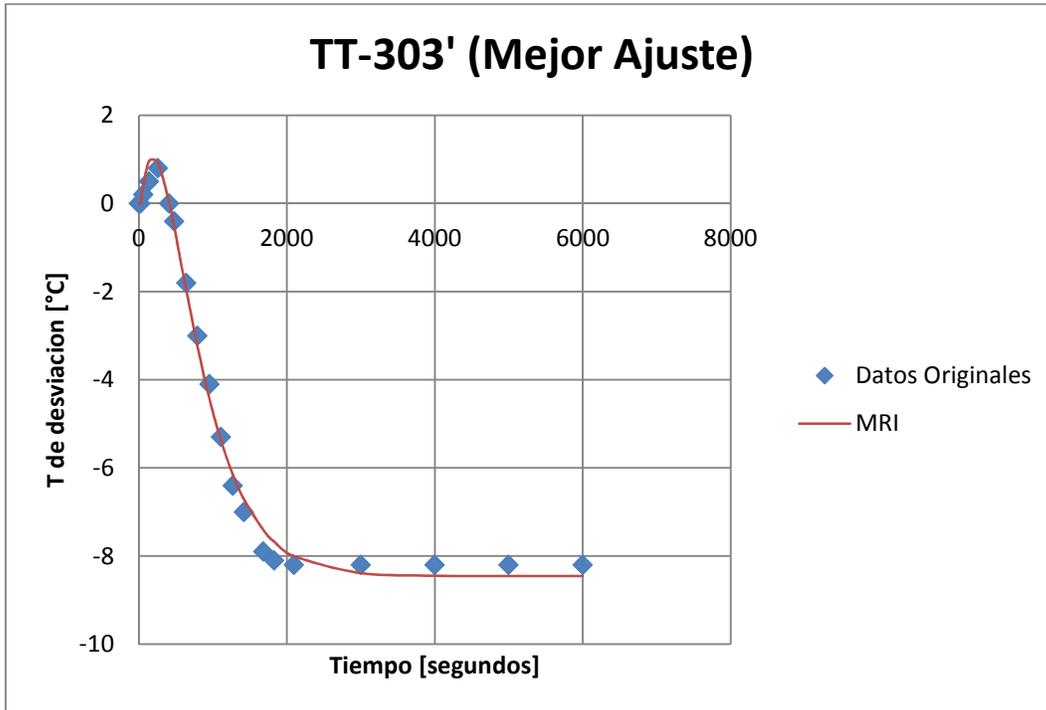
En la sección 2.2.2 se mencionó que las variables a manipular para el análisis de sensibilidad serían los flujos de alimentación de aire, CO₂ y solución de MEA. En la siguiente sección (3.1) se muestran los resultados obtenidos con el análisis de sensibilidad, es decir el modelo y los parámetros que mejor describen el comportamiento dinámico de las variables de salida así como las gráficas comparativas entre los resultados experimentales obtenidos y el modelo que mejor los describe. En el anexo 4 se encuentran todos los resultados experimentales y el ajuste de los modelos utilizados dadas las ecuaciones 2.2.3, 2.2.4, 2.2.5 y 2.2.7.

3.1 Resumen de resultados

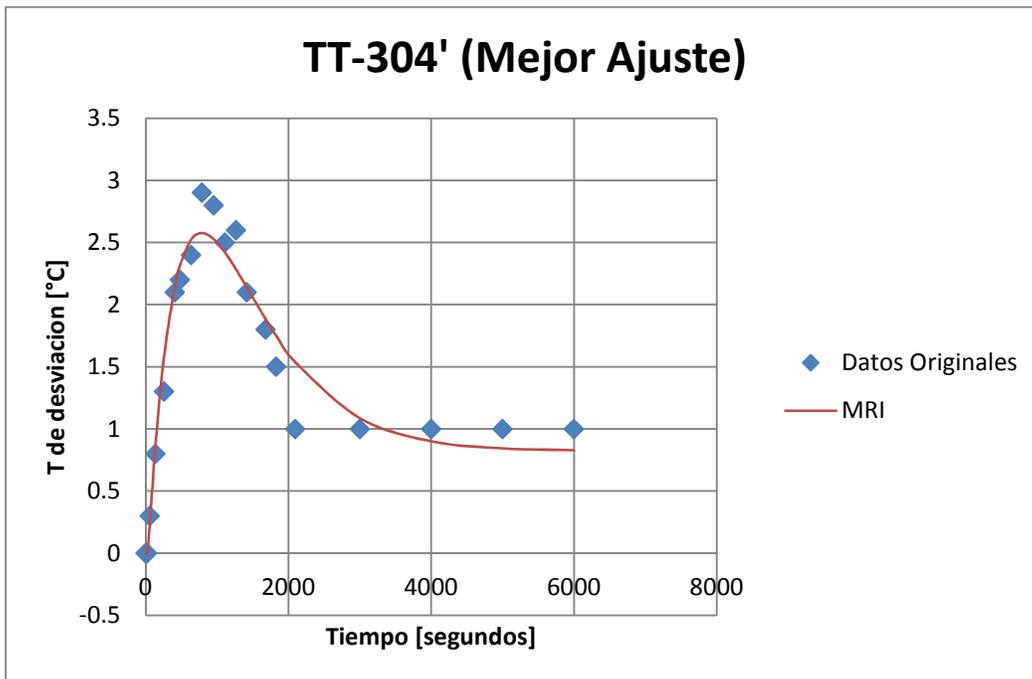
Perturbaciones en el flujo de alimentación de MEA.

Tabla 8.- Resultados para una perturbación de 2.09 L/h en el flujo de alimentación de MEA.							
Indicador	Modelo	Tiempo muerto [s]	Constante tiempo 1	Ganancia 1	Constante tiempo 2	Ganancia 2	Factor de Amortiguamiento
TI-302	Segundo Orden Sob.- Amort.	25	230.98	-6.51	-	-	1.06
TI-303	Respuesta Inversa	30	351.61	28.99	438.66	33.03	-
TI-304	Respuesta Inversa	35	604.15	16.44	711.24	16.05	-
TI-305	Segundo Orden Crit.- Amort.	50	219.89	6.65	-	-	1.00
TI-306	Segundo Orden Sob.- Amort.	60	205.34	6.74	-	-	1.44

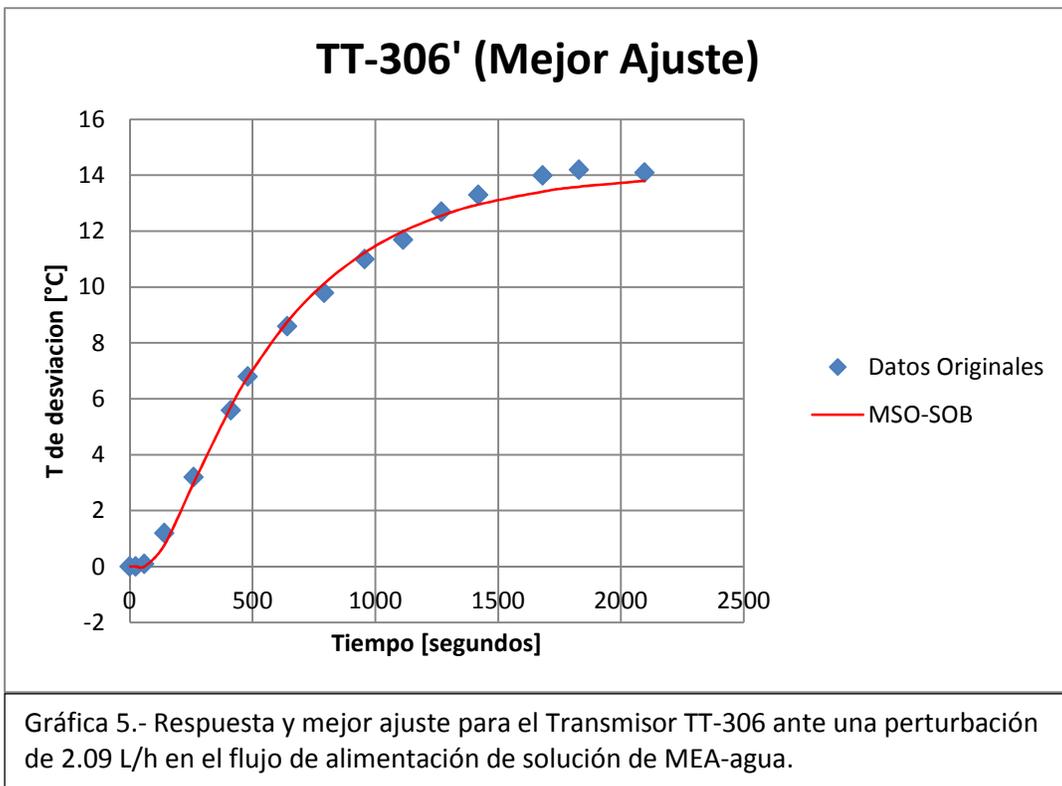
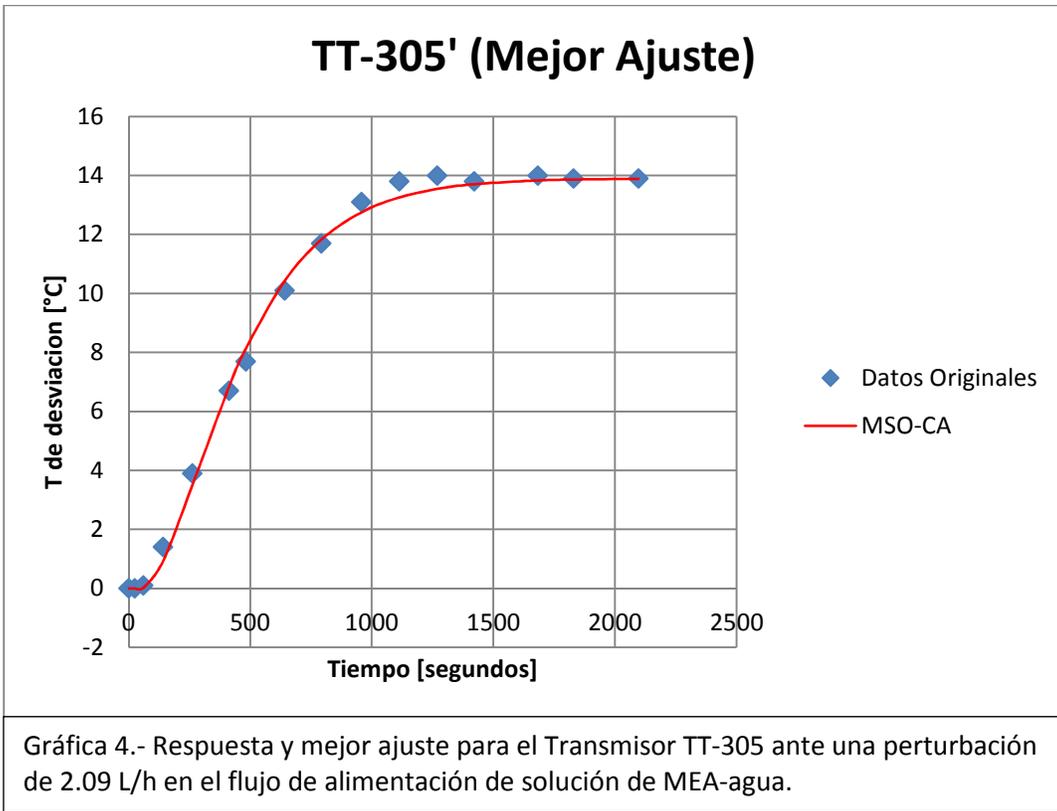




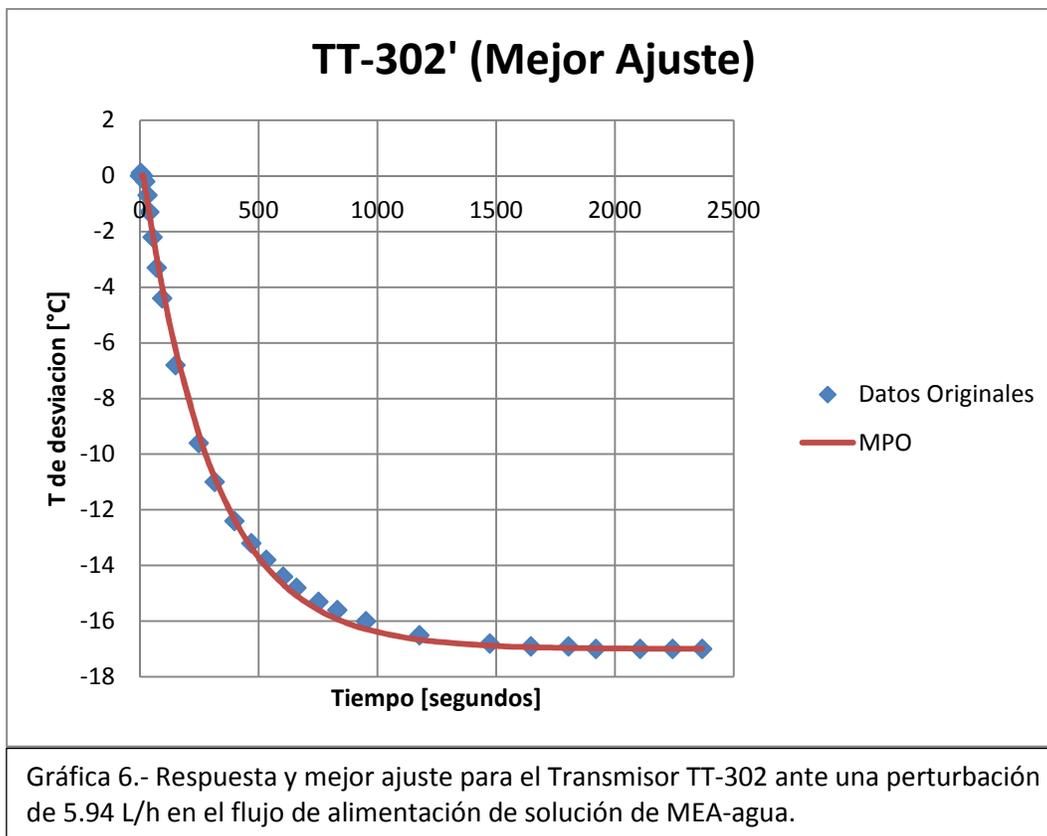
Gráfica 2.- Respuesta y mejor ajuste para el Transmisor TT-303 ante una perturbación de 2.09 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.

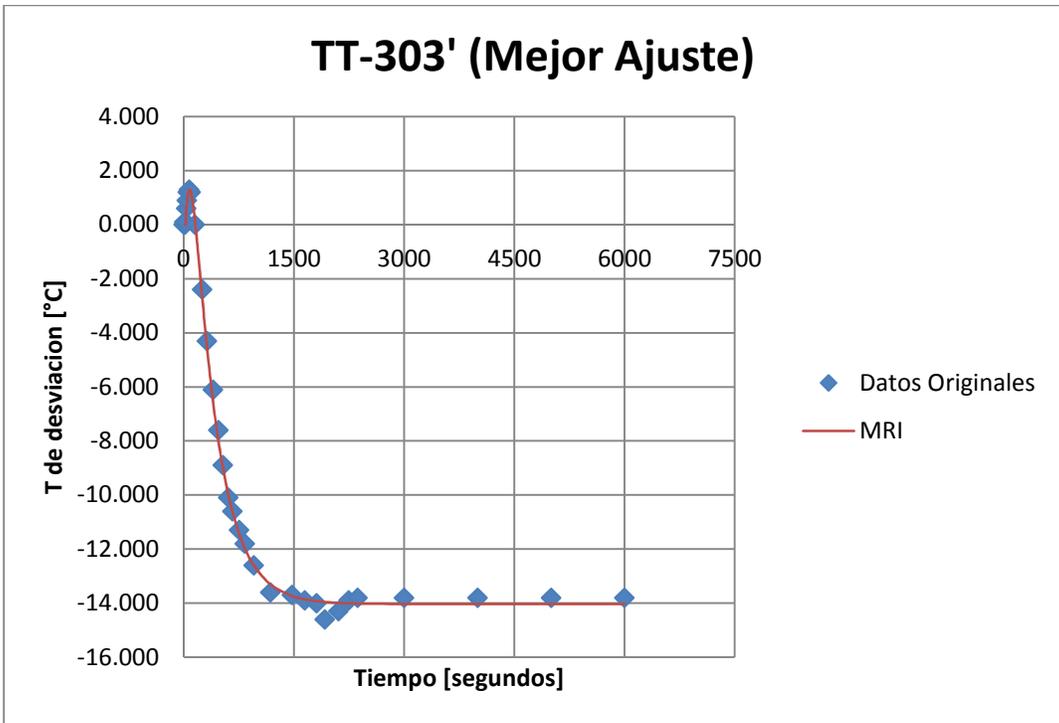


Gráfica 3.- Respuesta y mejor ajuste para el Transmisor TT-304 ante una perturbación de 2.09 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.

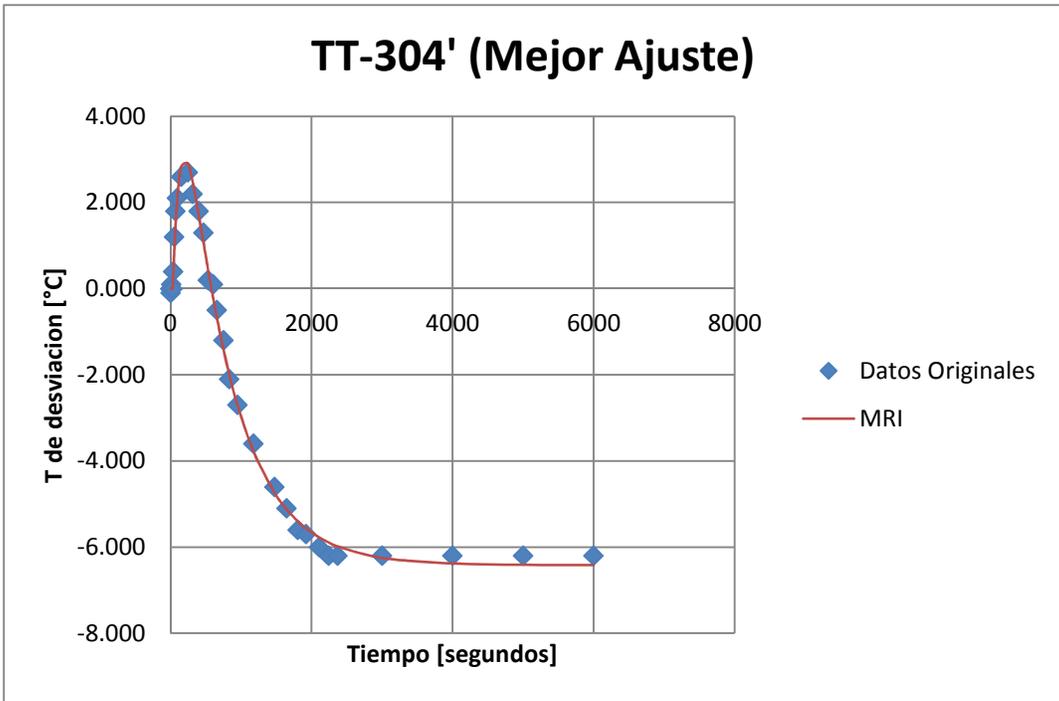


Indicador	Modelo	Tiempo muerto [s]	Constante tiempo 1	Ganancia 1	Constante tiempo 2	Ganancia 2	Factor de Amortiguamiento
TI-302	Primer Orden	15	295.43	-2.86	-	-	-
TI-303	Respuesta Inversa	25	72.92	1.53	333.77	3.89	-
TI-304	Respuesta Inversa	35	122.66	1.44	659.68	2.52	-
TI-305	Respuesta Inversa	50	367.88	16.26	477.17	16.12	-
TI-306	Respuesta Inversa	65	384.93	10.21	487.33	9.08	-

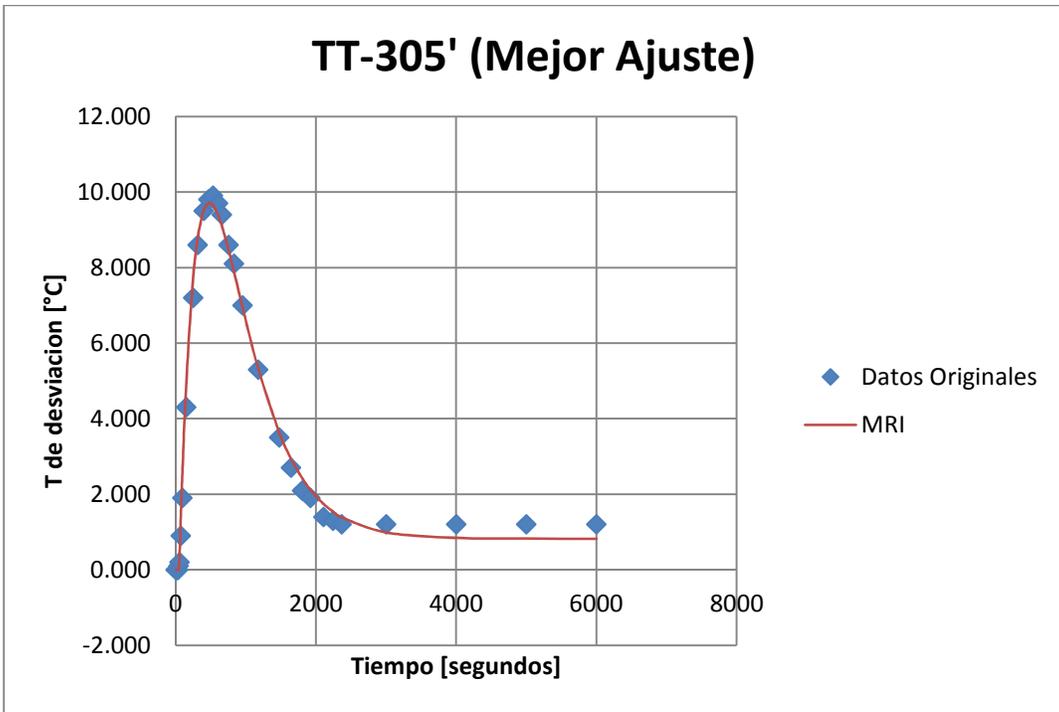




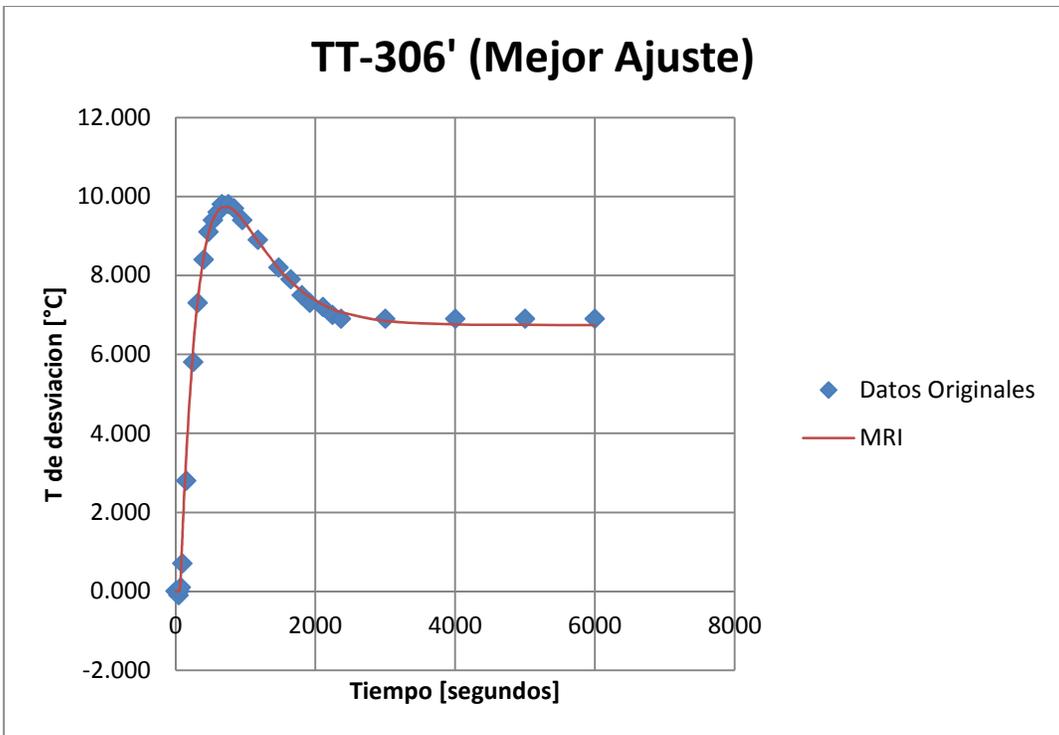
Gráfica 7.- Respuesta y mejor ajuste para el Transmisor TT-303 ante una perturbación de 5.94 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.



Gráfica 8.- Respuesta y mejor ajuste para el Transmisor TT-304 ante una perturbación de 5.94 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.

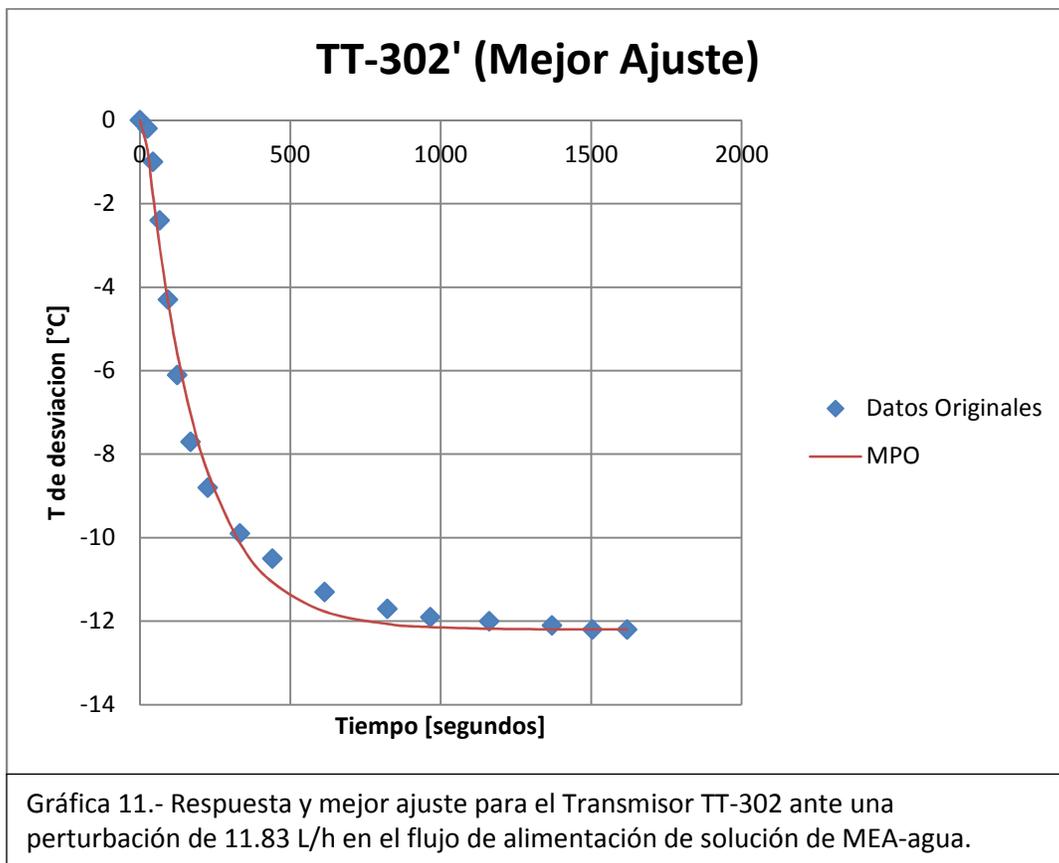


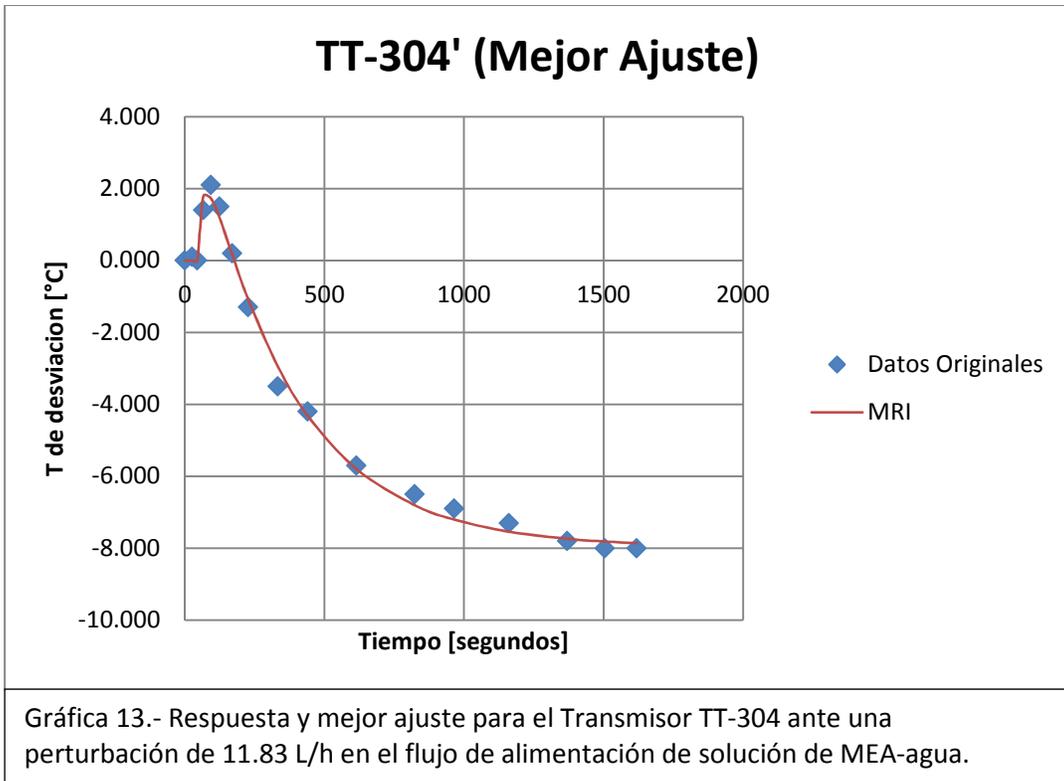
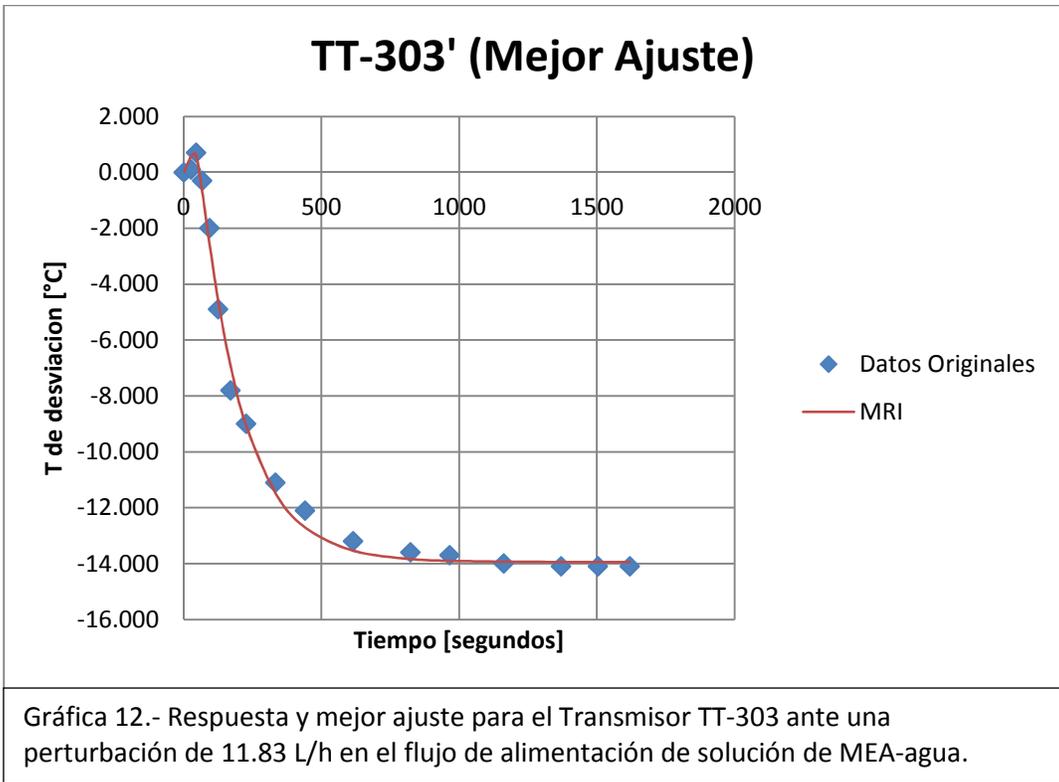
Gráfica 9.- Respuesta y mejor ajuste para el Transmisor TT-305 ante una perturbación de 5.94 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.

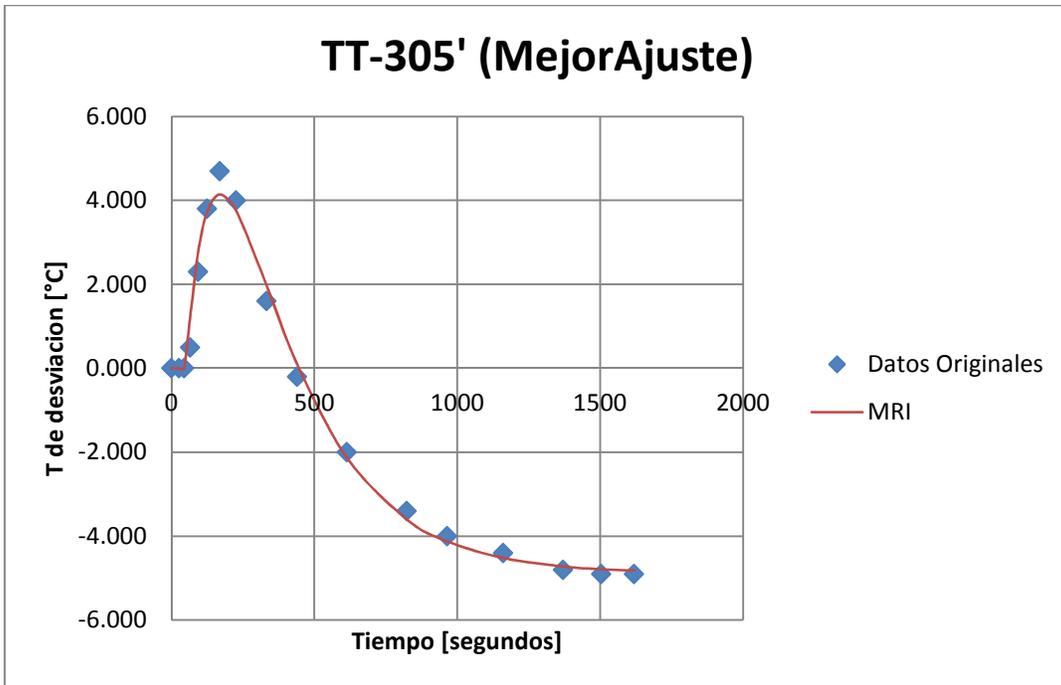


Gráfica 10.- Respuesta y mejor ajuste para el Transmisor TT-306 ante una perturbación de 5.94 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.

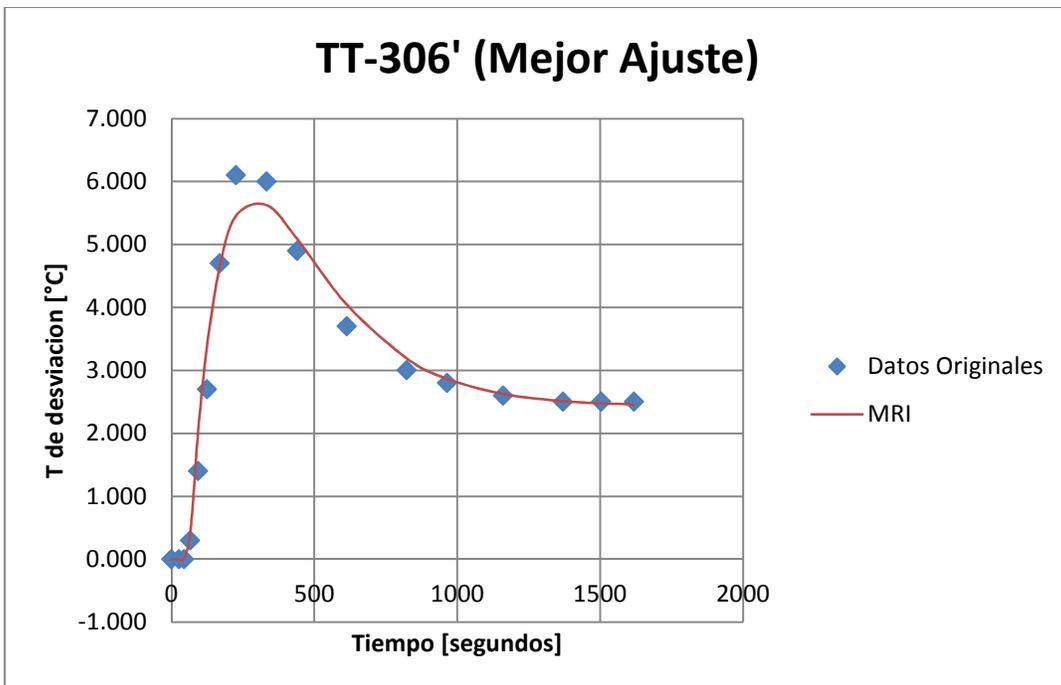
Tabla 10.- Resultados para una perturbación de 11.83 L/h en el flujo de alimentación de MEA.							
Indicador	Modelo	Tiempo muerto [s]	Constante tiempo 1	Ganancia 1	Constante tiempo 2	Ganancia 2	Factor de Amortiguamiento
TI-302	Primer Orden	15	179.27	-1.03	-	-	-
TI-303	Respuesta Inversa	20	18.08	0.38	155.89	1.55	-
TI-304	Respuesta Inversa	30	30.98	0.38	335.30	1.05	-
TI-305	Respuesta Inversa	50	104.07	1.54	269.27	1.95	-
TI-306	Respuesta Inversa	60	169.03	4.21	212.39	4.00	-







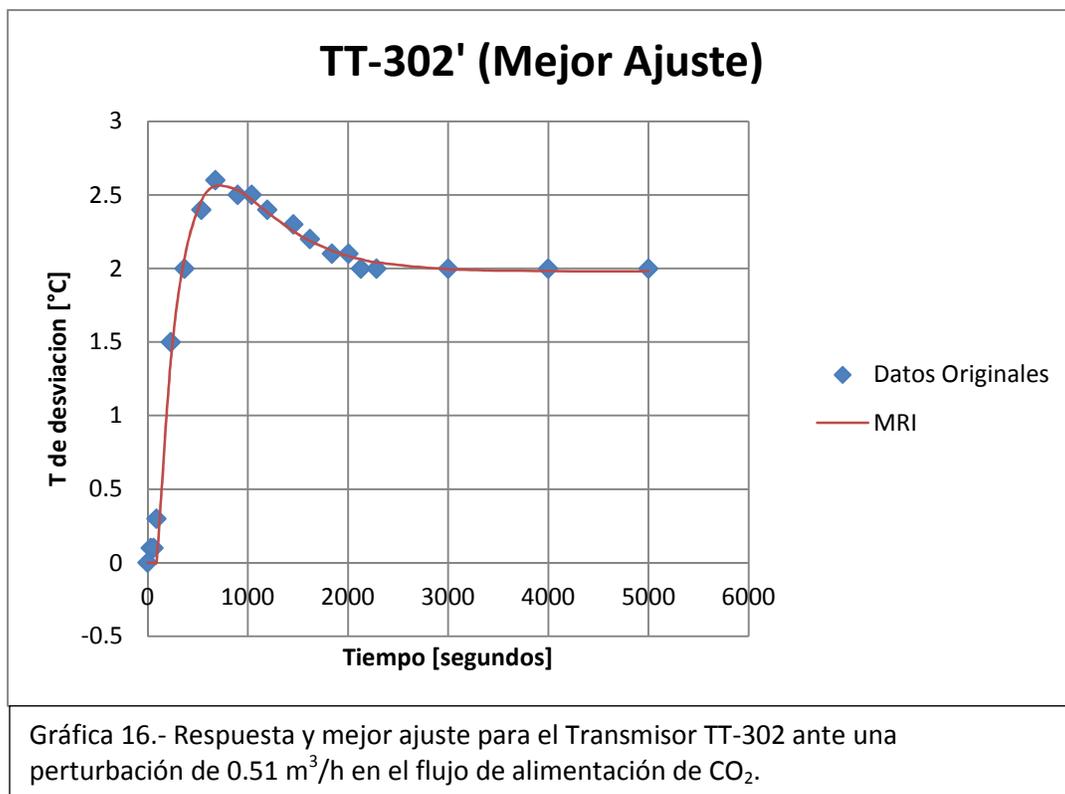
Gráfica 14.- Respuesta y mejor ajuste para el Transmisor TT-305 ante una perturbación de 11.83 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.

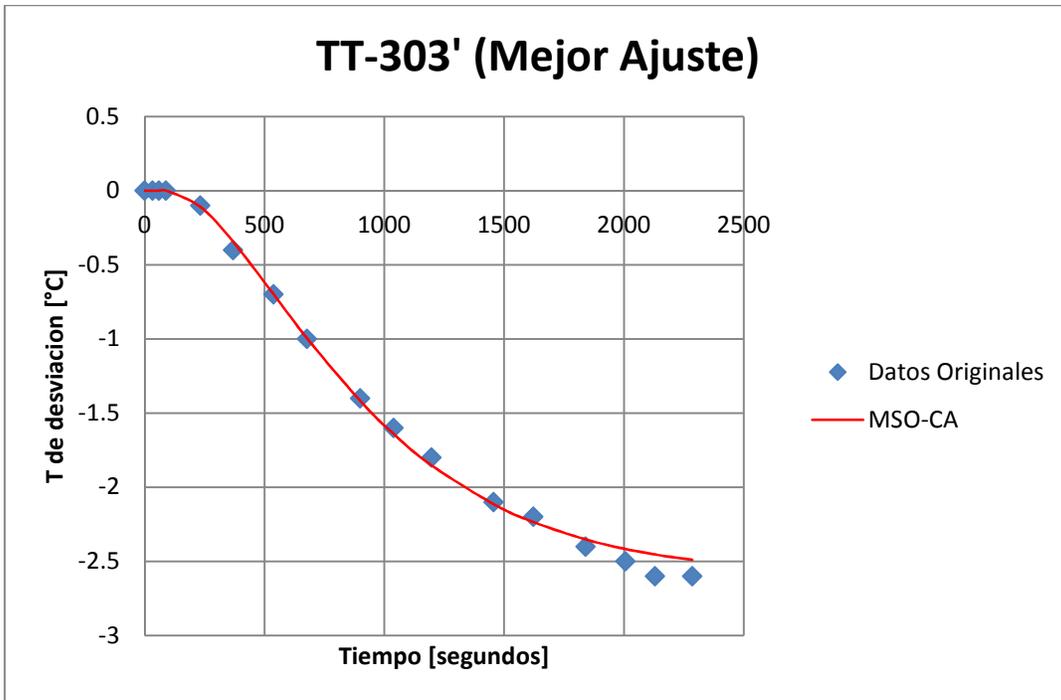


Gráfica 15.- Respuesta y mejor ajuste para el Transmisor TT-306 ante una perturbación de 11.83 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.

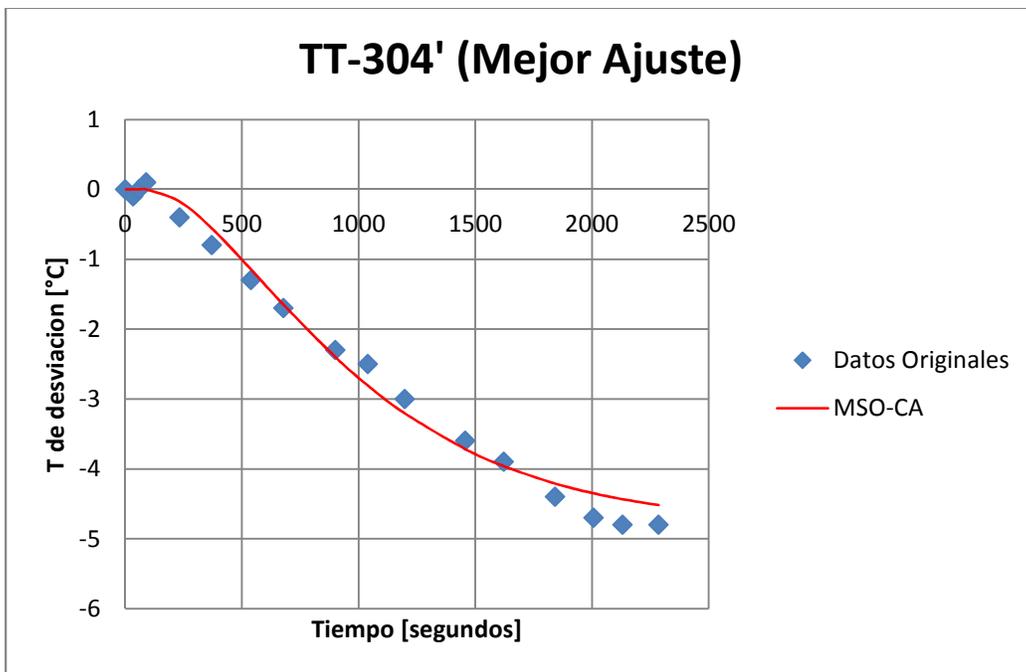
Perturbaciones en el flujo de alimentación de CO₂.

Tabla 11.- Resultados para una perturbación de 0.51 m ³ /h en el flujo de alimentación de CO ₂ .							
Indicador	Modelo	Tiempo muerto [s]	Constante tiempo 1	Ganancia 1	Constante tiempo 2	Ganancia 2	Factor de Amortiguamiento
TI-302	Respuesta Inversa	90	350.41	26.41	447.36	22.55	-
TI-303	Segundo Orden Crit.- Amort.	90	442.95	-5.06	-	-	1.00
TI-304	Segundo Orden Crit.- Amort.	90	483.01	-9.33	-	-	1.00
TI-305	Segundo Orden Sob.- Amort.	90	307.59	-10.31	-	-	1.24
TI-306	Segundo Orden Sob.- Amort.	90	164.20	-5.83	-	-	1.80





Gráfica 17.- Respuesta y mejor ajuste para el Transmisor TT-303 ante una perturbación de $0.51 \text{ m}^3/\text{h}$ en el flujo de alimentación de CO_2 .



Gráfica 18.- Respuesta y mejor ajuste para el Transmisor TT-304 ante una perturbación de $0.51 \text{ m}^3/\text{h}$ en el flujo de alimentación de CO_2 .

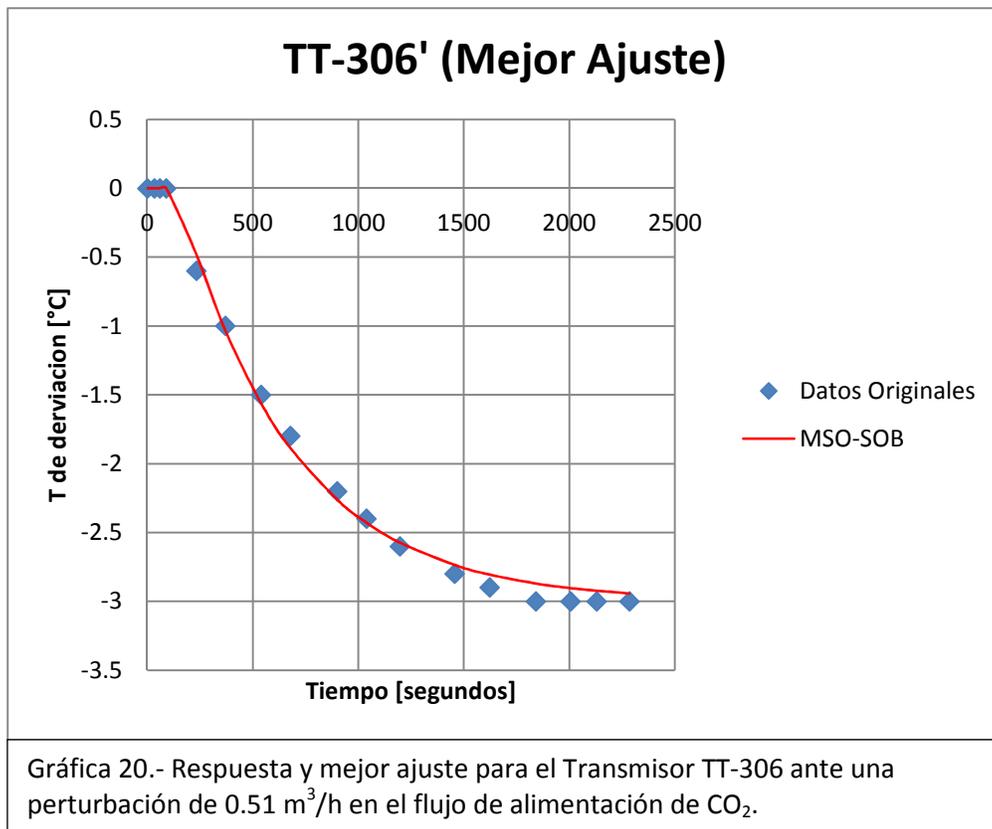
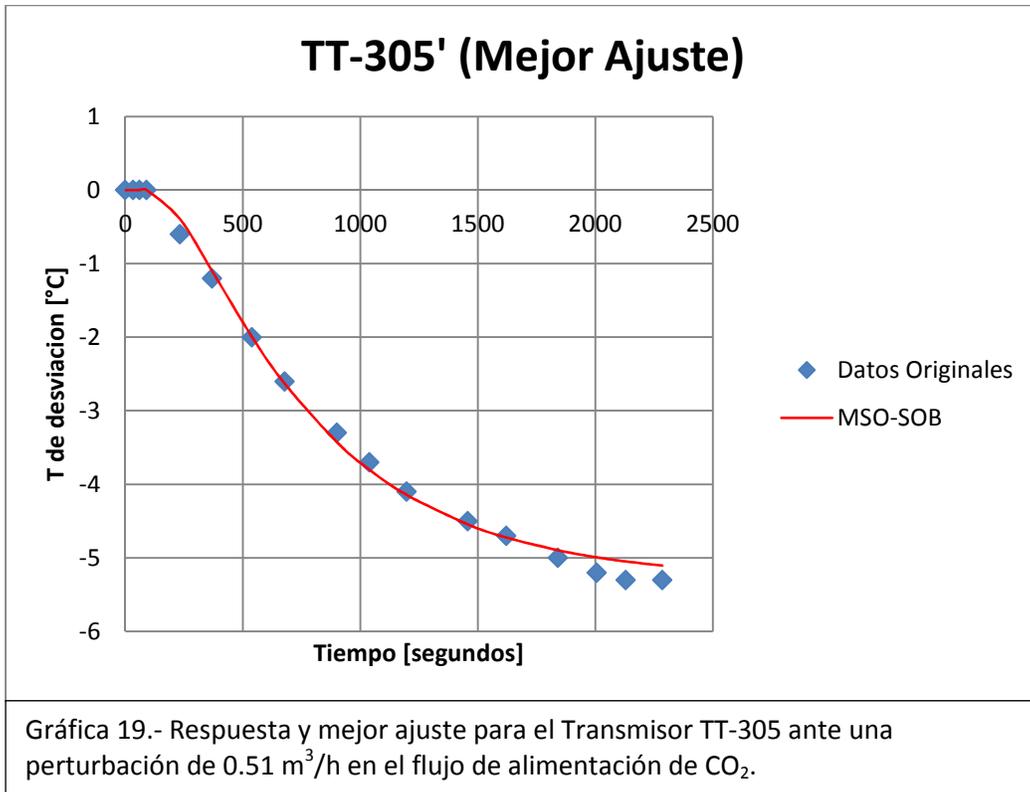
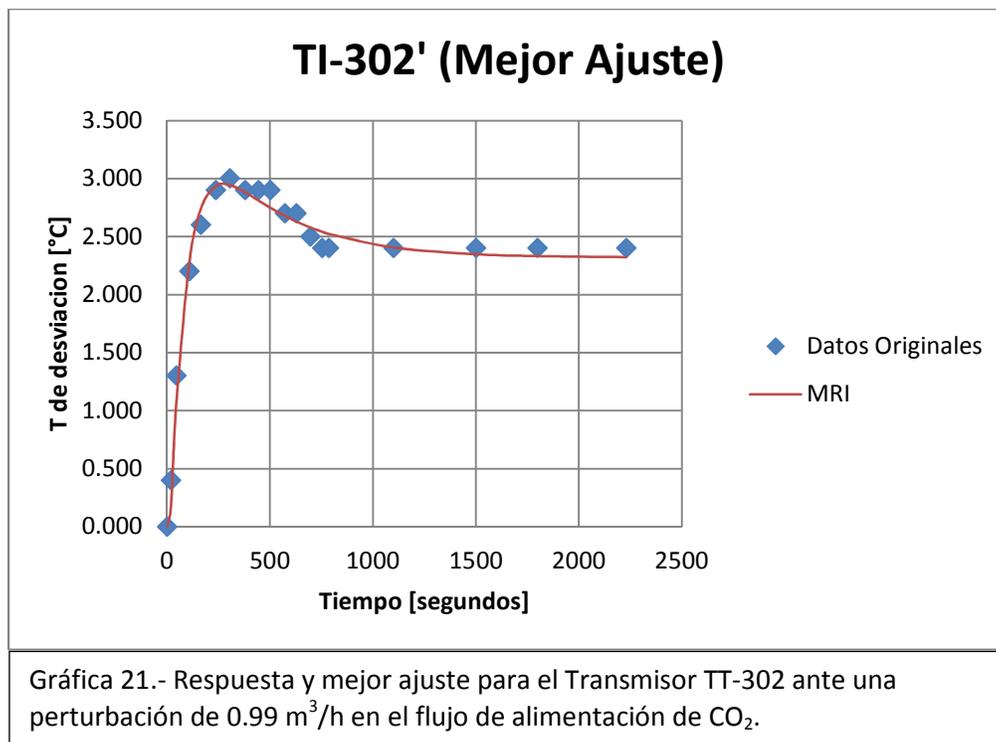
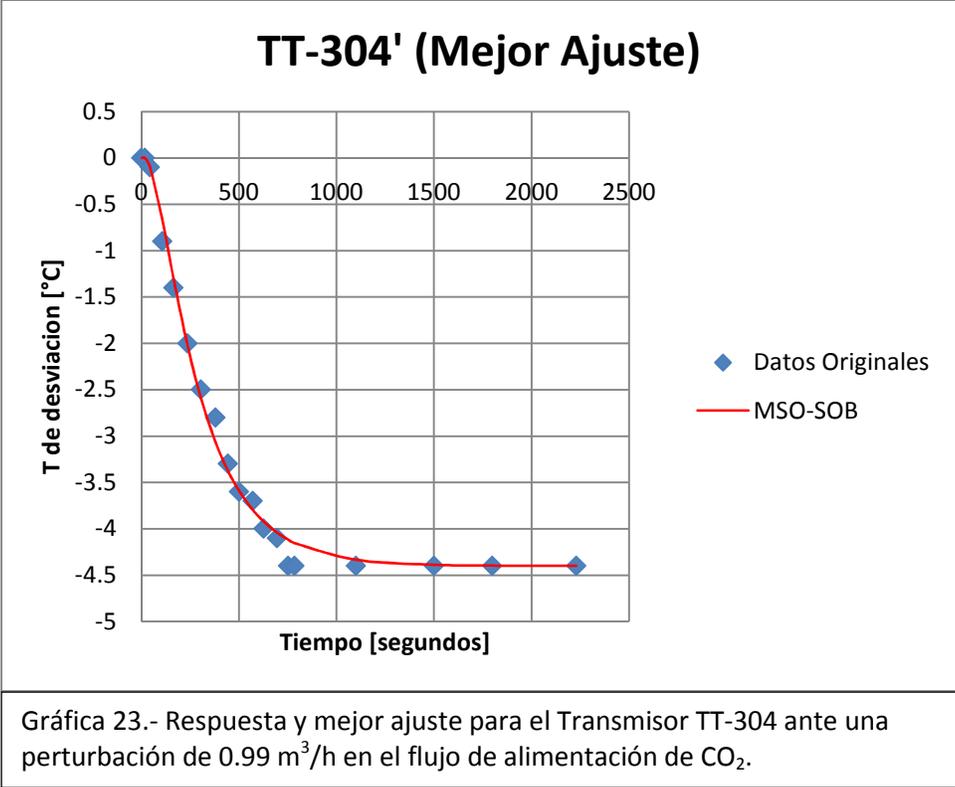
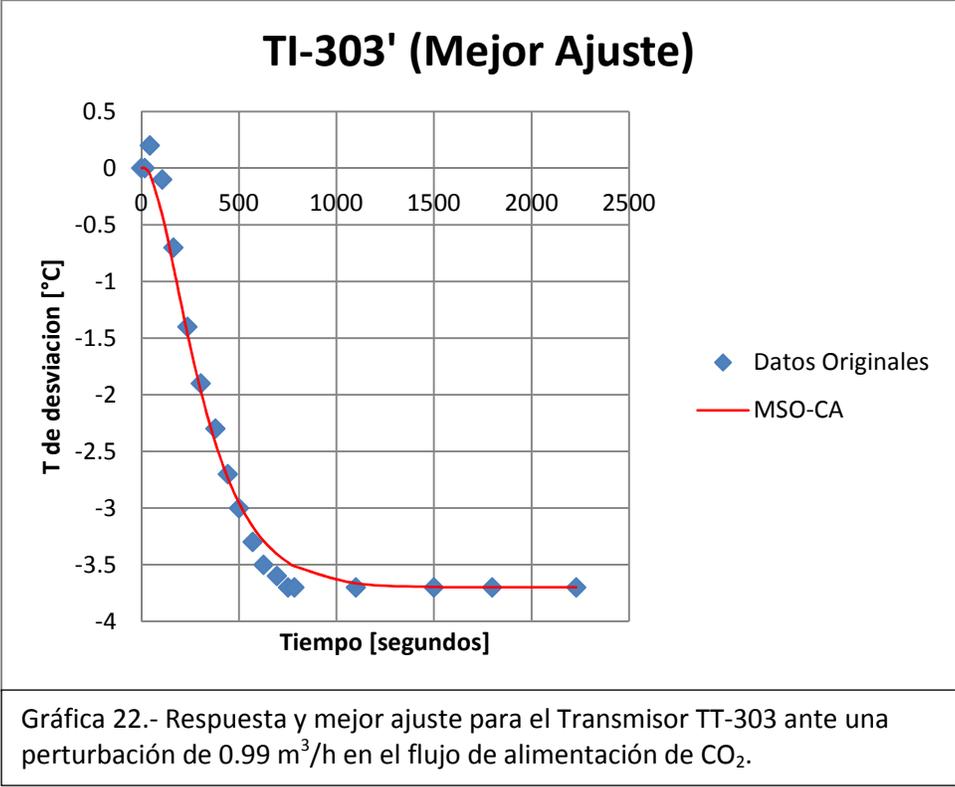


Tabla 12.- Resultados para una perturbación de 0.99 m ³ /h en el flujo de alimentación de CO ₂ .							
Indicador	Modelo	Tiempo muerto [s]	Constante tiempo 1	Ganancia 1	Constante tiempo 2	Ganancia 2	Factor de Amortiguamiento
TI-302	Respuesta Inversa	15	84.87	4.04	367.59	1.69	-
TI-303	Segundo Orden Crit.- Amort.	15	162.79	-3.76	-	-	1.00
TI-304	Segundo Orden Sob.- Amort.	15	129.13	-4.47	-	-	1.20
TI-305	Segundo Orden Sob.- Amort.	15	125.75	-5.07	-	-	1.13
TI-306	Segundo Orden Sob.- Amort.	15	92.10	-3.35	-	-	1.35





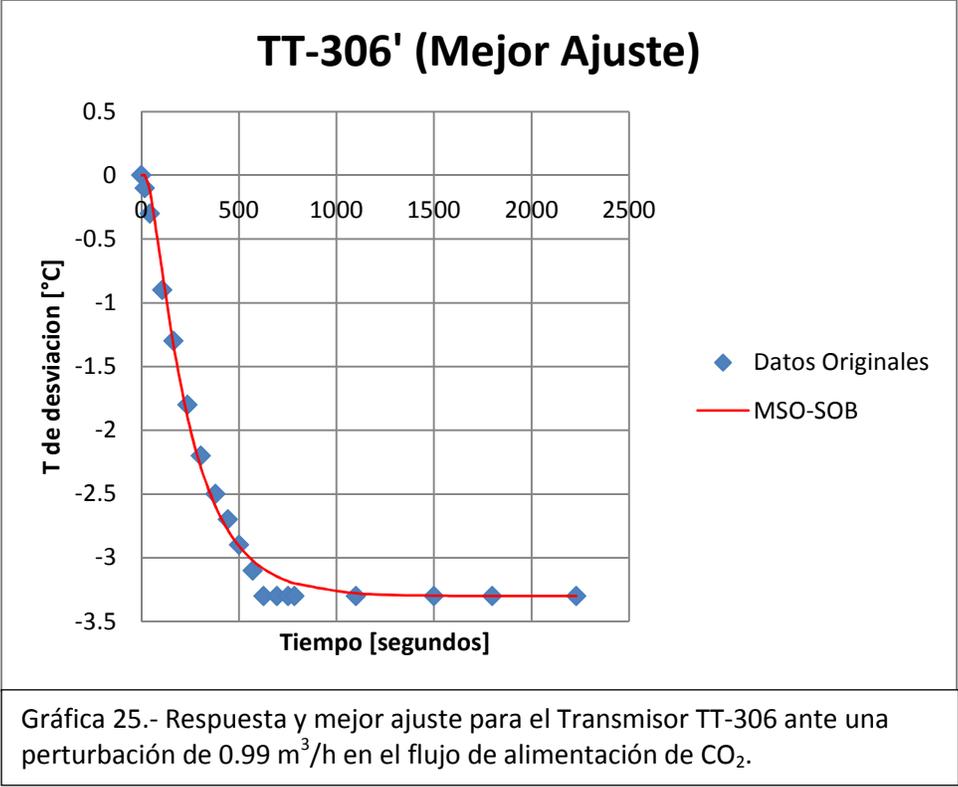
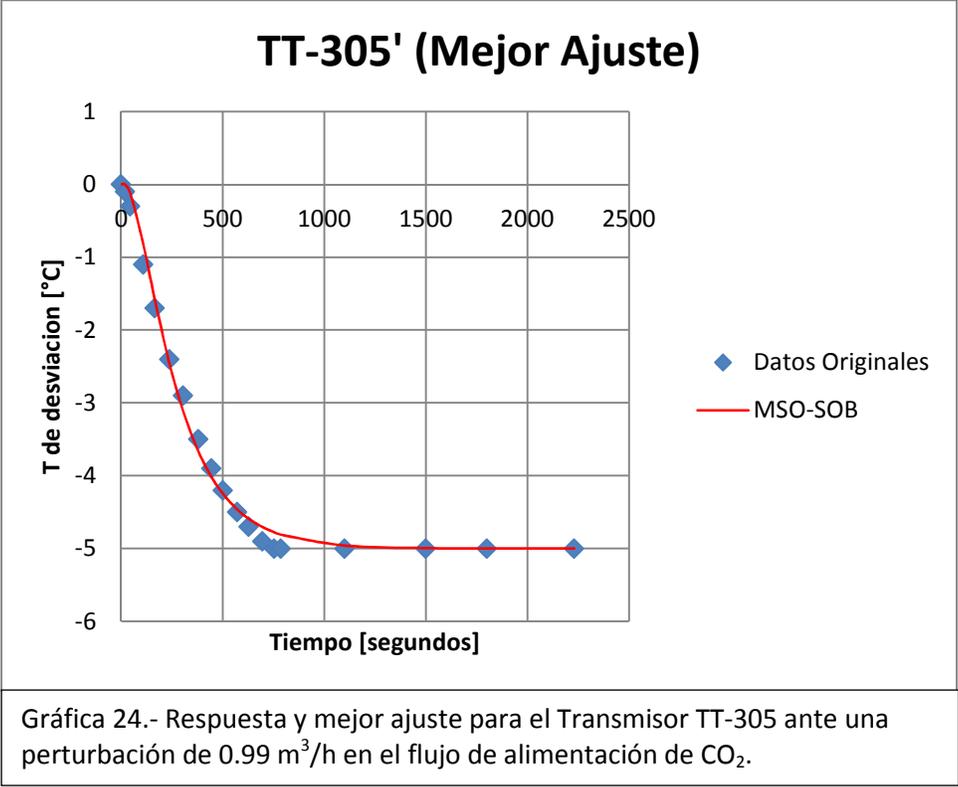
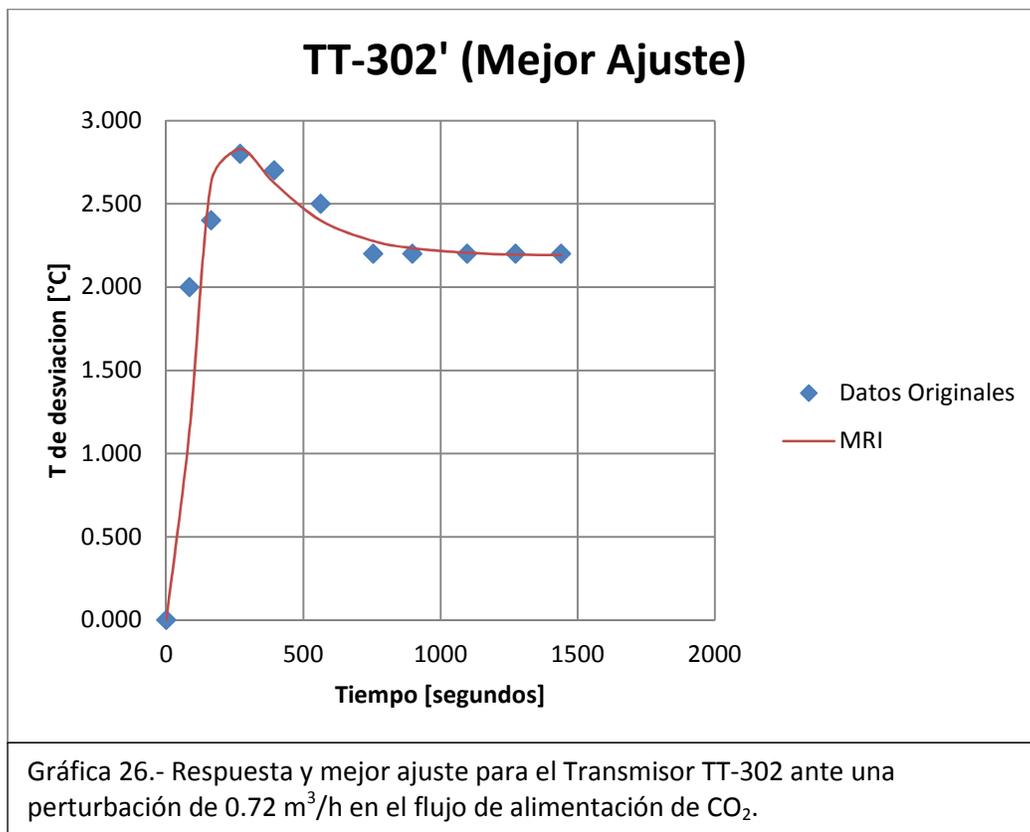
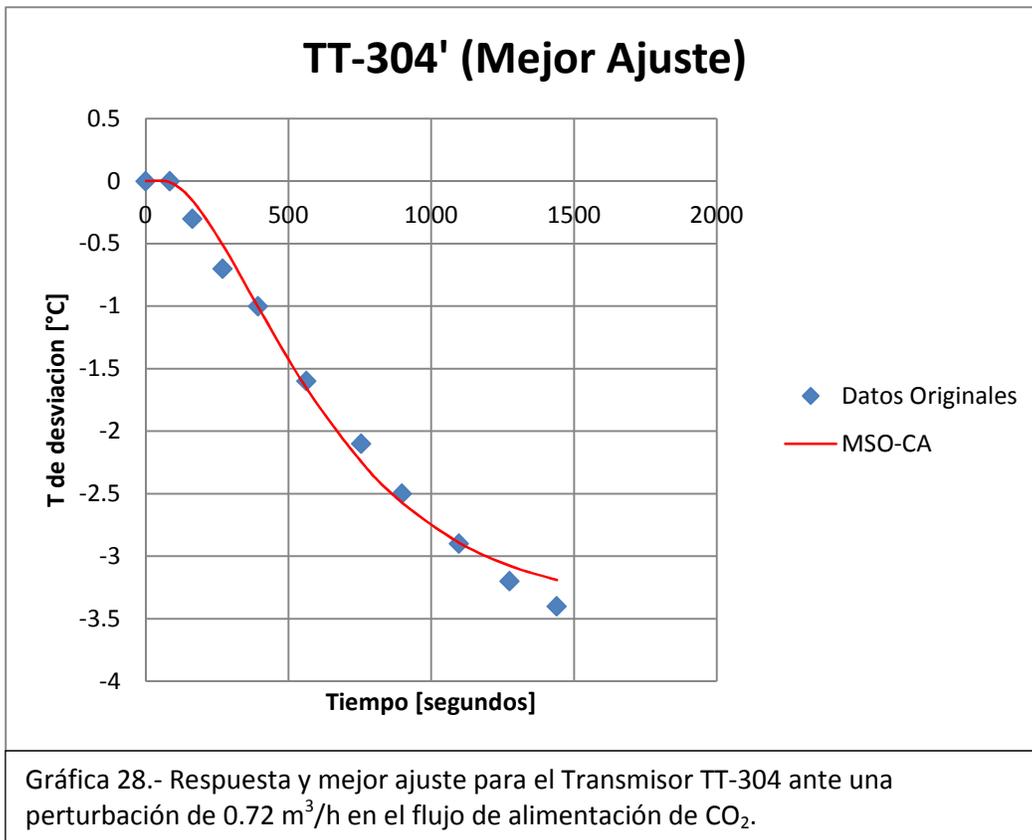
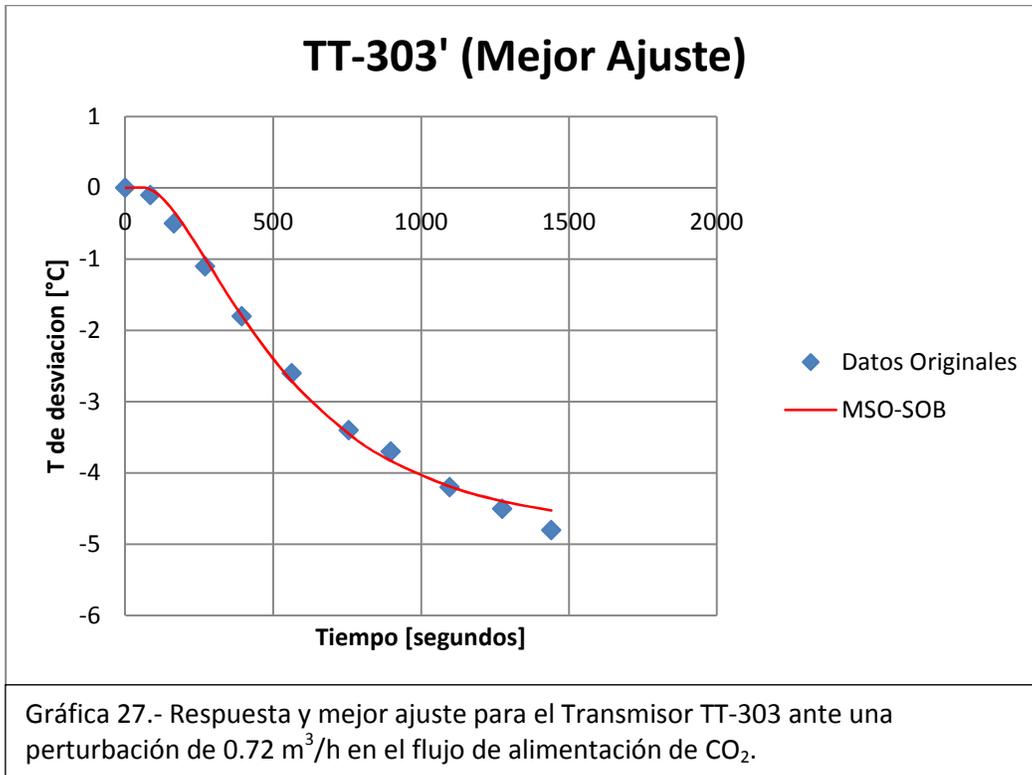
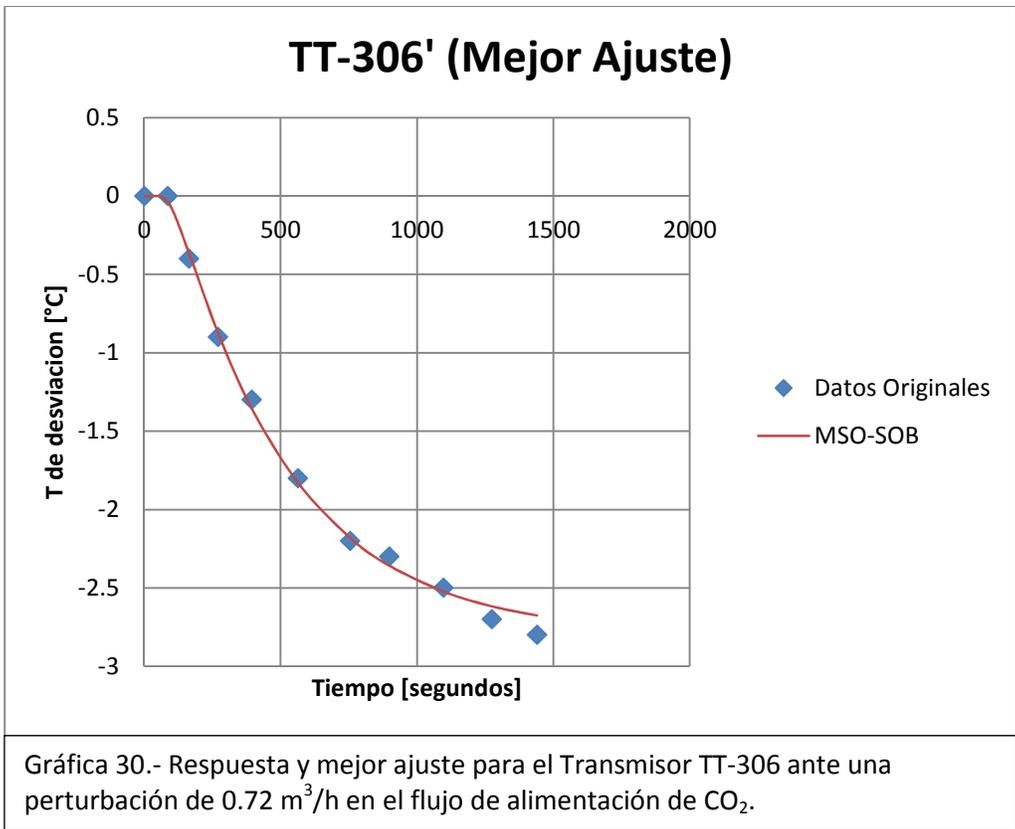
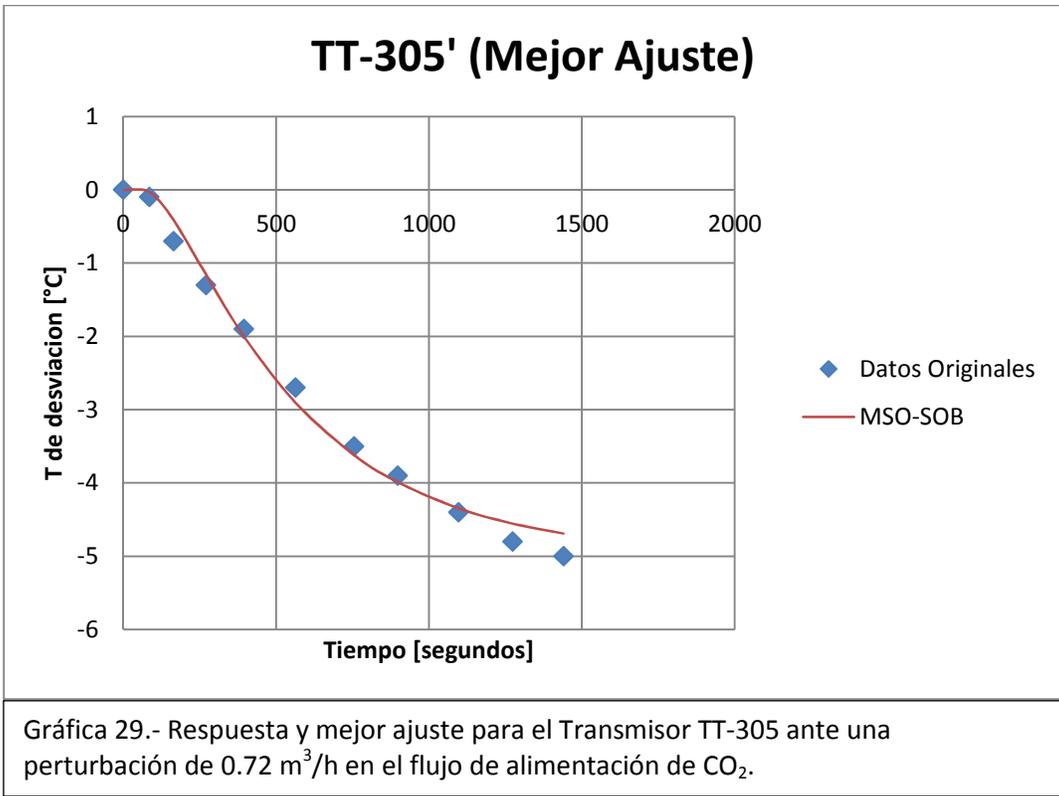


Tabla 13.- Resultados para una perturbación de 0.72 m ³ /h en el flujo de alimentación de CO ₂ .							
Indicador	Modelo	Tiempo muerto [s]	Constante tiempo 1	Ganancia 1	Constante tiempo 2	Ganancia 2	Factor de Amortiguamiento
TI-302	Respuesta Inversa	60	65.22	6.01	220.08	2.96	-
TI-303	Segundo Orden Sob.-Amort.	60	236.42	-6.71	-	-	1.18
TI-304	Segundo Orden Crit.-Amort.	60	307.22	-4.75	-	-	1.00
TI-305	Segundo Orden Sob.-Amort.	60	209.38	-6.99	-	-	1.32
TI-306	Segundo Orden Sob.-Amort.	60	144.83	-3.91	-	-	1.64

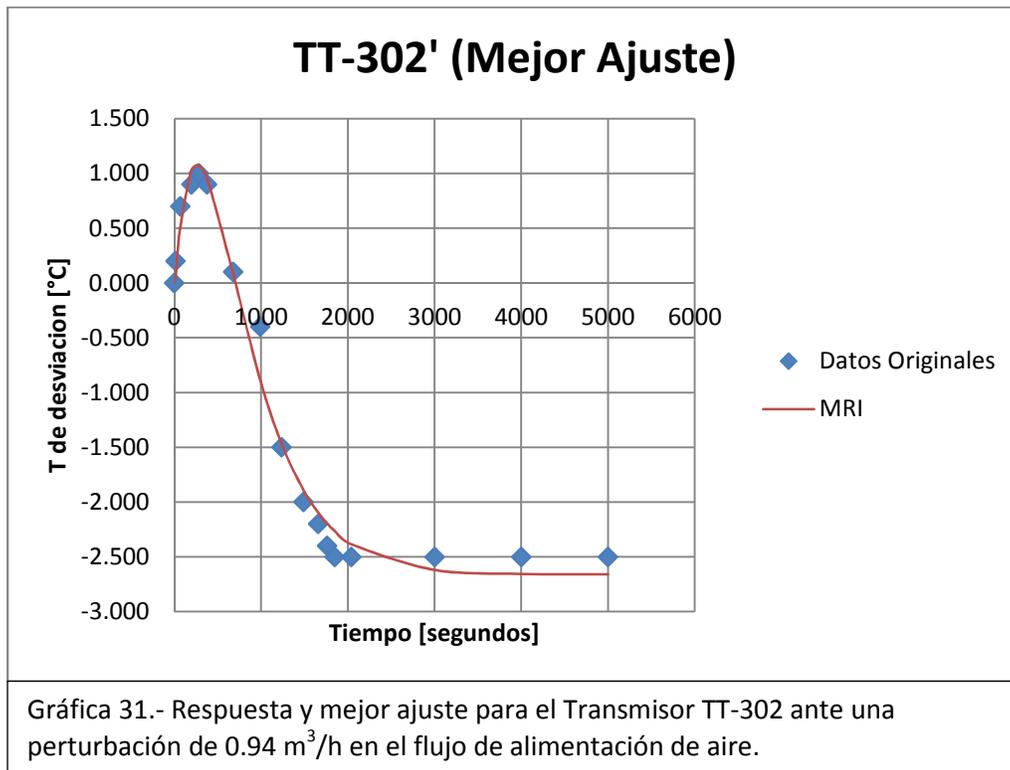


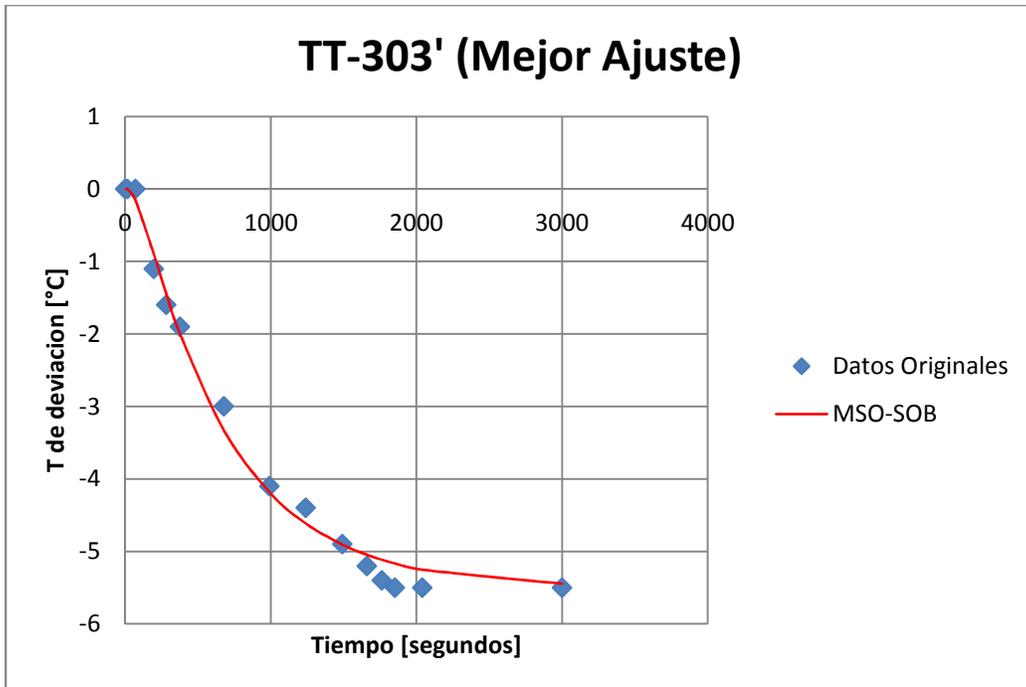




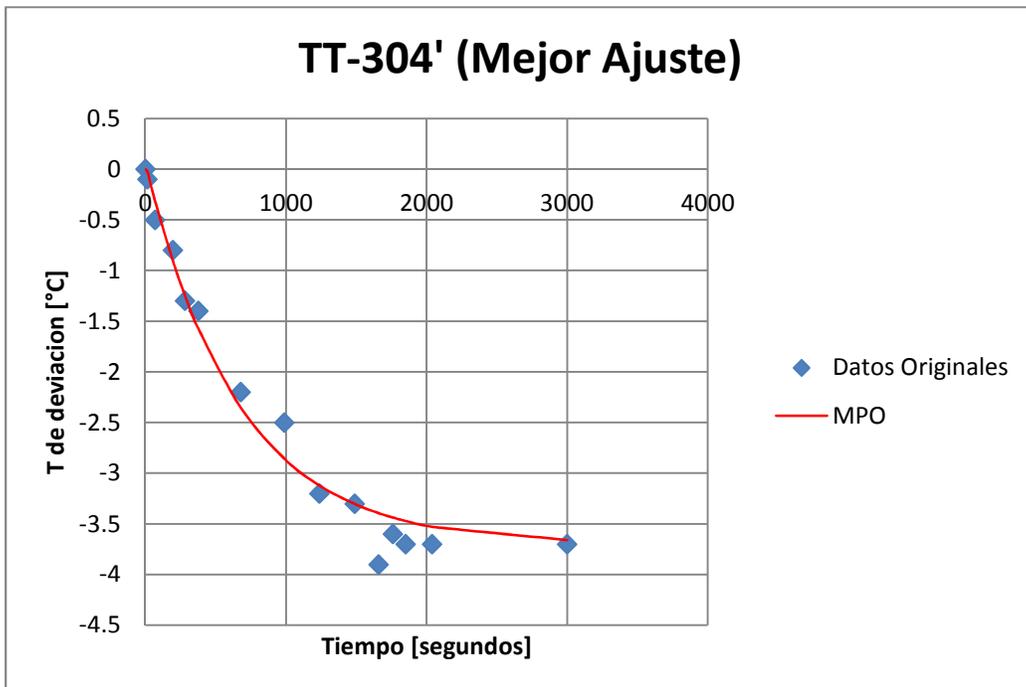
Perturbaciones en el flujo de alimentación de Aire.

Tabla 14.- Resultados para una perturbación de 0.94 m ³ /h en el flujo de alimentación de Aire.							
Indicador	Modelo	Tiempo muerto [s]	Constante tiempo 1	Ganancia 1	Constante tiempo 2	Ganancia 2	Factor de Amortiguamiento
TI-302	Respuesta Inversa	10	363.29	28.24	466.32	31.08	-
TI-303	Segundo Orden Sobre-Amort.	10	222.45	-5.87	-	-	1.59
TI-304	Primer Orden	10	661.74	-3.95	-	-	-
TI-305	Primer Orden	10	550.95	-5.34	-	-	-
TI-306	Primer Orden	10	286.13	-2.88	-	-	-

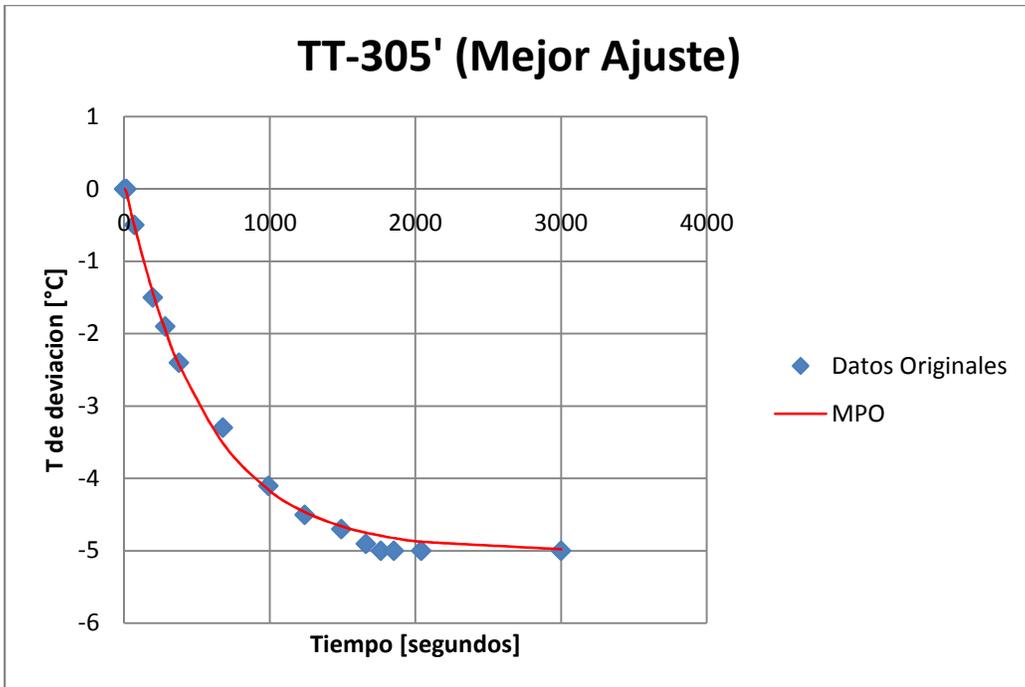




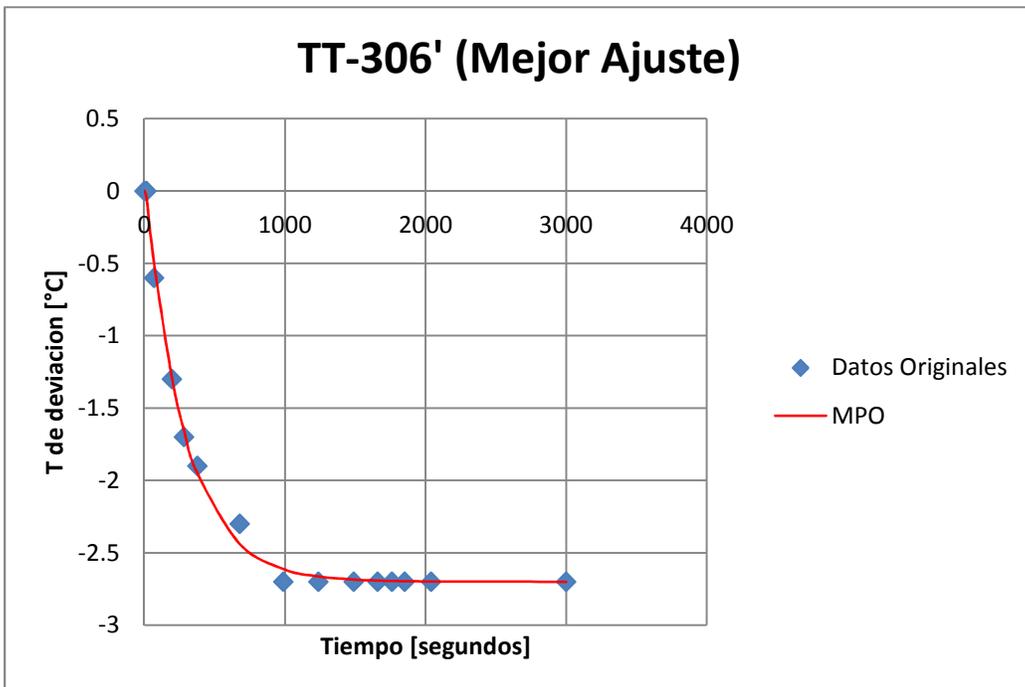
Gráfica 32.- Respuesta y mejor ajuste para el Transmisor TT-303 ante una perturbación de 0.94 m³/h en el flujo de alimentación de aire.



Gráfica 33.- Respuesta y mejor ajuste para el Transmisor TT-304 ante una perturbación de 0.94 m³/h en el flujo de alimentación de aire.

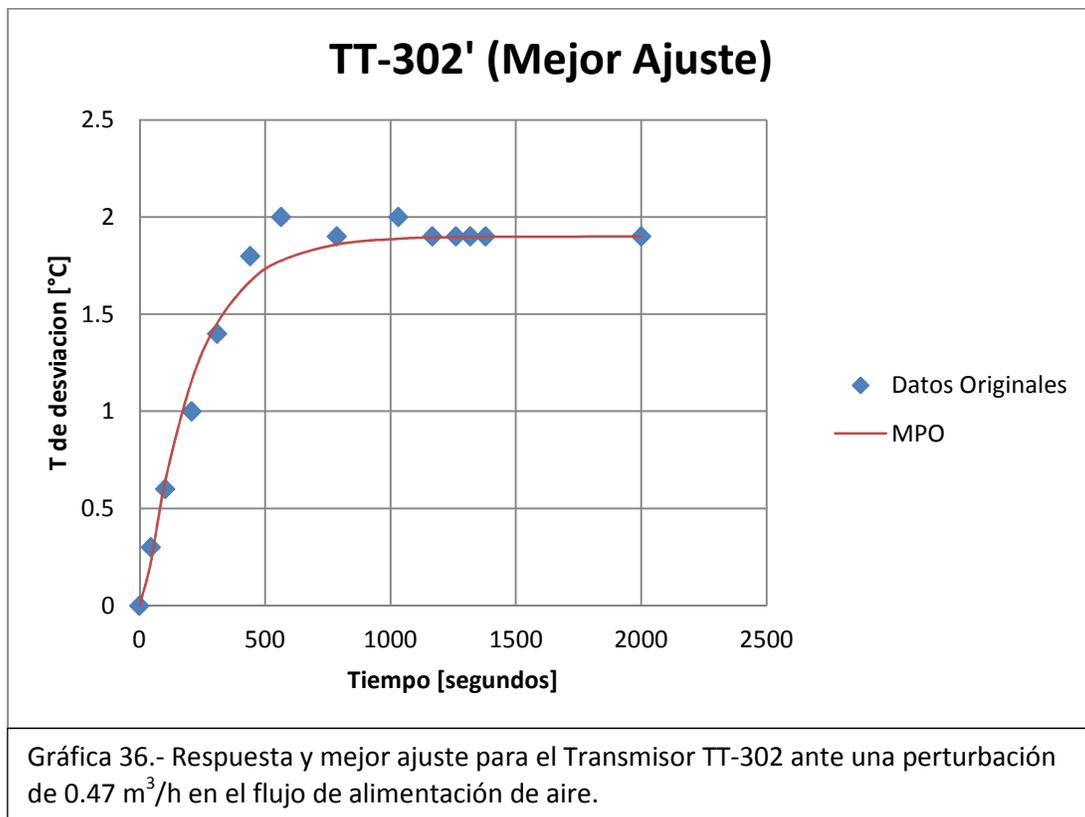


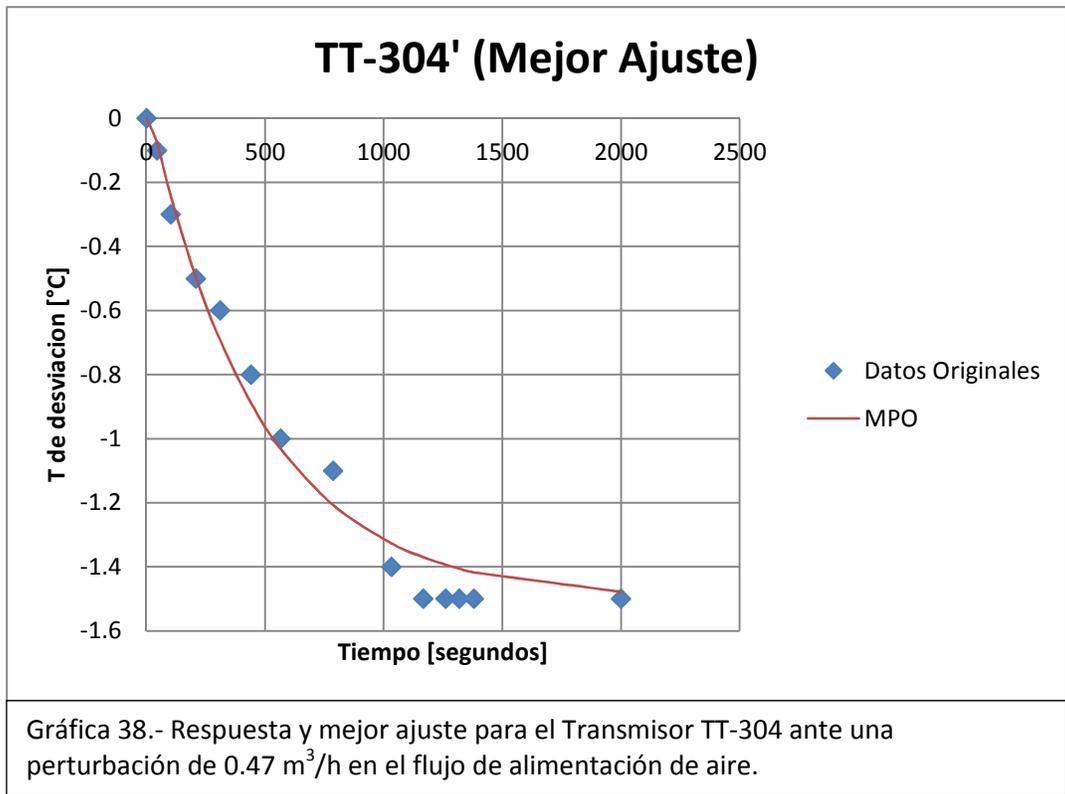
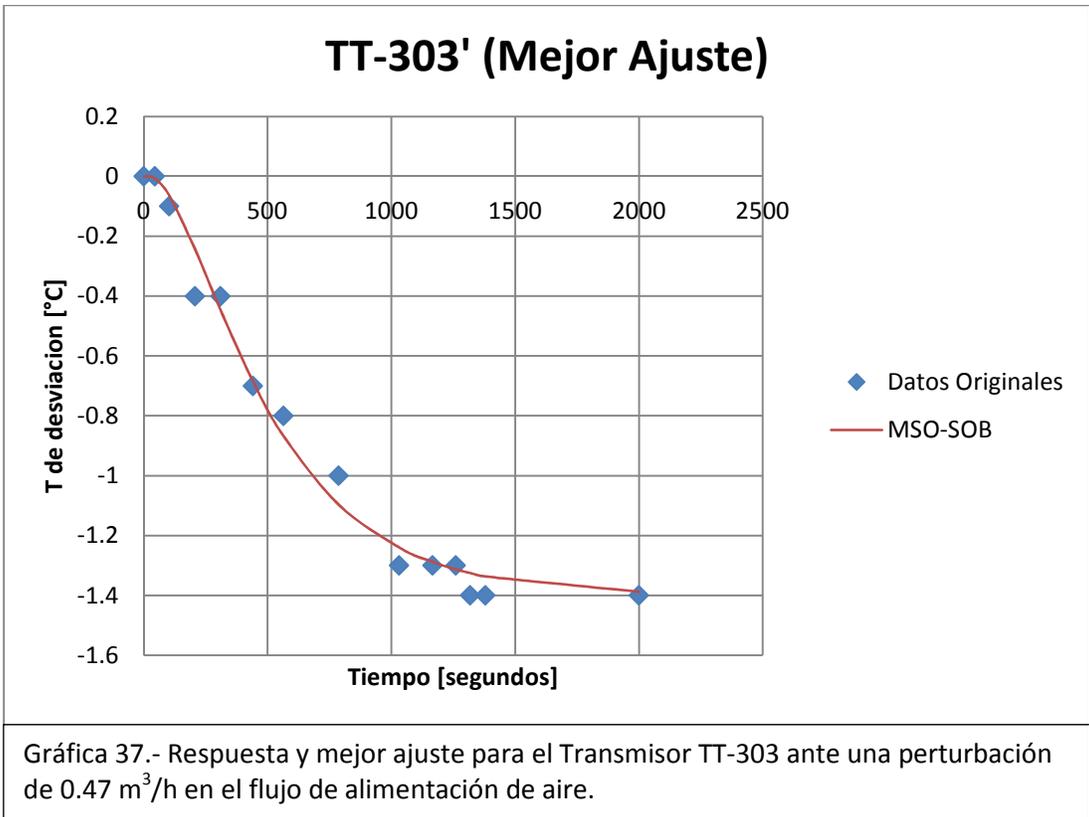
Gráfica 34.- Respuesta y mejor ajuste para el Transmisor TT-305 ante una perturbación de 0.94 m³/h en el flujo de alimentación de aire.

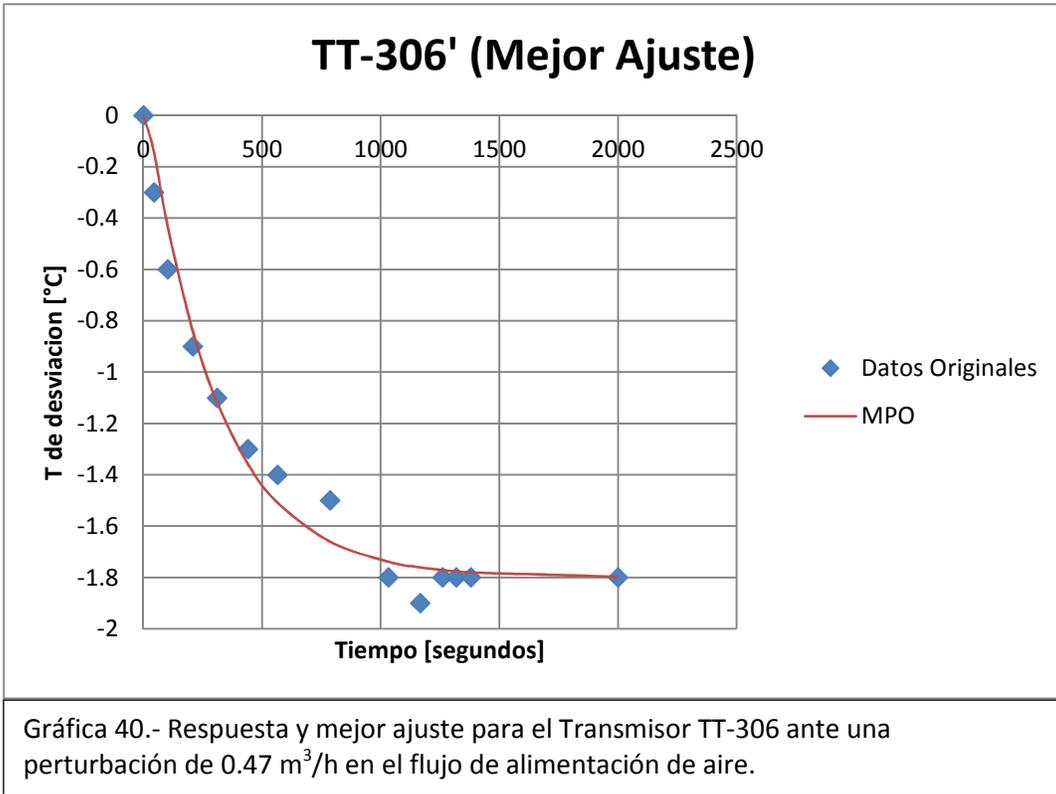
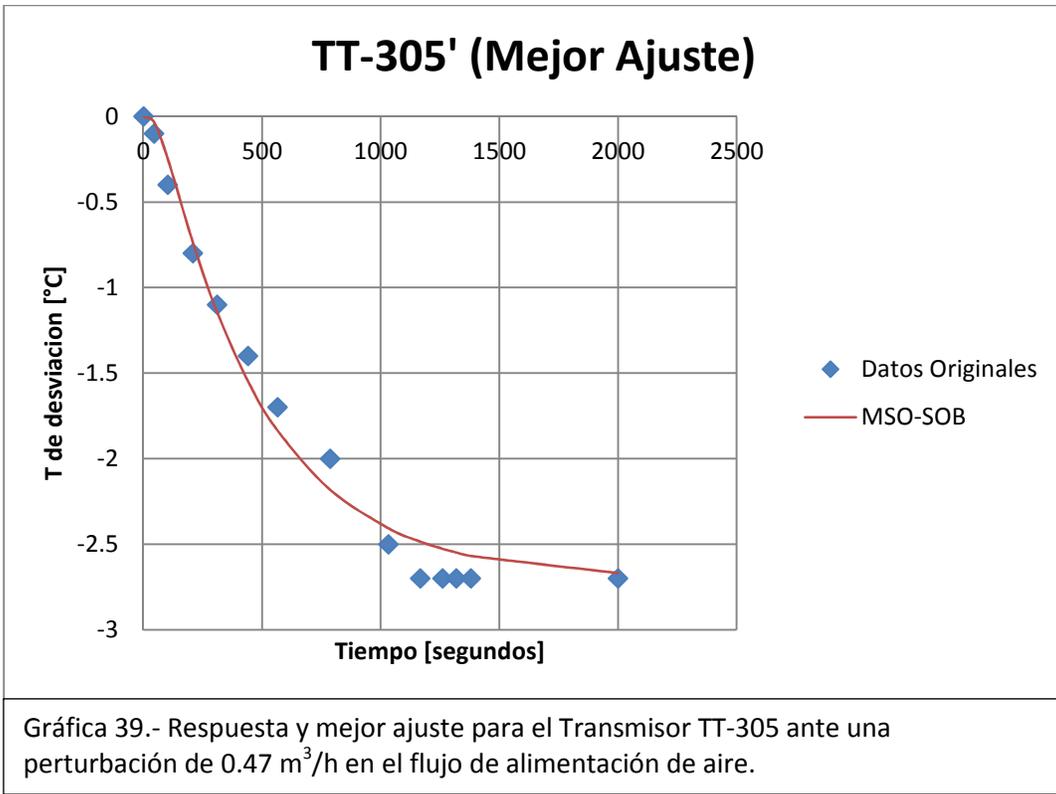


Gráfica 35.- Respuesta y mejor ajuste para el Transmisor TT-306 ante una perturbación de 0.94 m³/h en el flujo de alimentación de aire.

Tabla 15.- Resultados para una perturbación de 0.47 m ³ /h en el flujo de alimentación de Aire.							
Indicador	Modelo	Tiempo muerto [s]	Constante tiempo 1	Ganancia 1	Constante tiempo 2	Ganancia 2	Factor de Amortiguamiento
TI-302	Primer Orden	20	199.86	4.07	-	-	-
TI-303	Segundo Orden Sob.- Amort.	20	243.51	-3.00	-	-	1.09
TI-304	Primer Orden	20	469.36	-3.21	-	-	-
TI-305	Segundo Orden Sob.- Amort.	20	146.41	-5.79	-	-	1.65
TI-306	Primer Orden	20	299.61	-3.86	-	-	-







3.2 Conclusiones

En las Tablas 8, 9 y 10 así como en las Gráficas 1 a la 15 se observa como es la respuesta en la temperatura a lo largo de la columna para diferentes perturbaciones en el flujo de solución MEA-Agua y los modelos que mejor describen dicha respuesta. En general lo que se observa es que cuando el flujo aumenta la temperatura disminuye cada vez más en la columna. También es posible notar como el comportamiento en cada sección de la columna varia según el tamaño de la perturbación realizada. Así, se tiene que para la perturbación mas pequeña (2.09 L/h) la respuesta en el censor más cercano a la perturbación (TT-302) es sólo un enfriamiento, esto por que la solución de MEA se encuentra a una temperatura menor a la del estado estacionario original marcada en dicho censor. Conforme se avanza a lo largo de la columna se nota que este efecto de enfriamiento es cada vez menor, así en la gráfica correspondiente al censor TT-303 se observa un ligero calentamiento provocado por la reacción química que se da entre la MEA y el CO₂ seguido de un enfriamiento no tan grande como el presente en el sensor TT-302. Este mismo efecto presente a la altura del censor TT-303 se nota en el censor TT-304, sólo que aquí se nota que el enfriamiento es menor debido a que la solución de MEA se calienta conforme recorre los empaques dentro de la columna. En los sensores TT-305 y TT-306 sólo se observa que la temperatura dentro de la columna aumenta. Esto se debe a que la solución de MEA ya ha recorrido un largo tramo dentro de la columna

por lo que en esta zona sólo se aprecia el efecto del calentamiento asociado a la reacción química presente.

Para la perturbación intermedia en el flujo de solución de MEA (5.94 L/h) se observa que el efecto mencionado antes en el censor TT-302 es mayor, es decir, la temperatura disminuye aun mas en esa sección de la torre. Para los sensores TT-303, TT-304, TT-305 y TT-306 se encuentra el mismo fenómeno de respuesta inversa que el mencionado anteriormente para los sensores TT-303 y TT-304 ante la perturbación pequeña (2.09 L/h), para esta perturbación se puede notar que el efecto del enfriamiento alcanza a llegar hasta el final de la sección empacada (TT-306), de la misma manera se percibe que dicho enfriamiento es cada vez menor conforme la solución de MEA recorre la columna.

Por ultimo, la respuesta en la columna ante la perturbación más grande que se realizó (11.83 L/h) es muy similar a la respuesta que se observa ante la perturbación de 5.94 L/h, con la diferencia de que al ser un flujo de solución de MEA mayor que todos los anteriores, el efecto de enfriamiento a lo largo de la columna es más notorio.

En las Tablas 11, 12 y 13 así como en las Gráficas 16 a la 30, se observa cómo es la respuesta en la temperatura a lo largo de la columna para diferentes perturbaciones en el flujo de CO₂ y los modelos que mejor describen dicha respuesta.

En este caso se realizaron perturbaciones de 0.51, 0.72 y 0.99 m³/h en la alimentación de CO₂. Para todas las perturbaciones realizadas se encontró que la respuesta de la temperatura a lo largo de la columna es similar. En el sensor TT-306, que es el más cercano a la alimentación de la mezcla gaseosa, se puede apreciar que el efecto de las perturbaciones es un enfriamiento, provocado por el aumento en el flujo de CO₂ que entra a una temperatura menor que la del estado estacionario en la columna, este efecto de enfriamiento se hace presente también en los sensores TT-305, TT-304 y TT-303. También se observa que el enfriamiento es mayor en la zona más cercana a la alimentación de la mezcla gaseosa y este efecto va disminuyendo conforme avanzamos hacia el domo de la columna. En la región en la que está instalado el sensor TT-302 se aprecia un comportamiento diferente, aquí se nota que para todas las perturbaciones se presenta un fenómeno de respuesta inversa, presentándose primero un calentamiento y luego un enfriamiento, esto es debido a que en esa zona, que es la más cercana a la alimentación de la solución de MEA, el efecto de la reacción química se hace notorio mientras que el efecto del enfriamiento provocado por el aumento en la alimentación de CO₂ tiene menos impacto. Revisando los resultados se notan diferencias entre los modelos que describe la respuesta en la temperatura registrada en los sensores instalados en diferentes secciones de la columna, todos los modelos que describen las respuestas para el caso de las perturbaciones en el flujo de alimentación de

CO₂ son de segundo orden, lo cual indica que la respuesta es lenta ante una perturbación de esta variable en particular; en cuanto a las diferencias entre los modelos, esto se da entre el críticamente amortiguado y el sobreamortiguado; pero cuando revisamos el factor de amortiguamiento para los casos de modelos sobreamortiguados se nota que el valor no es muy lejano al valor crítico, esto sólo indica que en esos casos la respuesta es un poco mas lenta, lo cual puede ser provocado por la influencia de la distribución de los empaques dentro de la columna y como los fluidos se desplazan a través de estos.

En las Tablas 14 y 15 así como en las Gráficas 31 a la 40 se observa cómo es la respuesta en la temperatura a lo largo de la columna para diferentes perturbaciones en el flujo de aire y los modelos que mejor describen dicha respuesta.

Para este caso sólo se realizaron perturbaciones de 0.47 y 0.94 m³/h en el flujo de alimentación de aire. Para la perturbación más pequeña se observa que del sensor TT-303 al TT-306 se da un enfriamiento, mientras que en el sensor TT-302 se presenta un calentamiento leve el cual también podemos asociar a la reacción química. En cuanto a la perturbación de 0.99 m³/h se puede notar que el comportamiento en los sensores TT-303 al TT-306 es similar, sólo que el efecto de enfriamiento es mas notorio; en cuanto al sensor TT-302, éste registra un fenómeno de respuesta inversa, primero detecta un aumento en la temperatura y luego un enfriamiento, esto puede

deberse a que al inicio la temperatura aumenta por la reacción pero después se registra un enfriamiento debido al aumento en la alimentación de aire el cual está a una temperatura menor que la columna en el estado estacionario inicial. Como en el caso de las perturbaciones en el flujo de alimentación de CO_2 , los modelos presentan saltos, pero esta vez entre modelos de primer orden y de segundo orden sobreamortiguados, esto también puede ser provocado por la influencia de la distribución de los empaques dentro de la columna y como los fluidos se desplazan a través de estos.

Revisando las tablas también se puede notar que para las perturbaciones en el flujo de MEA es notorio como el tiempo muerto crece conforme aumenta la longitud de la columna, mientras que cuando se perturba el flujo de alimentación de alguno de los gases la respuesta ocurre prácticamente al mismo tiempo a lo largo de la columna. También se nota que las perturbaciones en el flujo de alimentación de solución de MEA tienen más impacto que las realizadas en el flujo de alimentación de CO_2 o el de aire sobre las variables de salida; es decir, tiene mayor ganancia, sin embargo las perturbaciones de MEA responden de manera más lenta que las perturbaciones sobre los flujos de aire o CO_2 lo cual nos dice que la respuesta a una perturbación en el flujo de MEA es menos dinámica que una en los flujos de alguno de los gases.

En base a lo anteriormente mencionado se procedió a crear un programa en Excel®+Visual Basic® que considera cualquier magnitud de escalón entre

los límites evaluados experimentalmente para las perturbaciones realizadas en el flujo de alimentación de MEA y que muestra la respuesta en forma de variables de desviación, este programa se encuentra explicado en el anexo 5.

En base a los resultados obtenidos, se llegó a la conclusión de que las perturbaciones en el flujo de MEA son las mejores para plantear un protocolo experimental para la materia de "LIQ IV" en el área de "Dinámica y Control de Procesos" (lo cual es el objetivo principal de esta tesis) ya que a pesar de que la respuesta es menos dinámica, tiene mayor ganancia que la observada en las otras perturbaciones realizadas en los flujos de aire y CO₂, y muestra los cambios en el tiempo muerto a lo largo de la columna, lo cual es muy conveniente para fines didácticos.

En lo que a los objetivos se refiere, ambos se cumplieron satisfactoriamente. Es importante en este punto decir que los objetivos son subsecuentes y que la propuesta de un protocolo experimental no se hubiera logrado sin cumplir antes con realizar el análisis de sensibilidad de la columna.

Los resultados del análisis de sensibilidad fueron ampliamente satisfactorios, se logró estudiar experimentalmente un fenómeno que se ve poco en las clases de teoría, como lo es la absorción con reacción química, desde el punto de vista de la dinámica de procesos.

Los resultados de los modelos obtenidos son muy interesantes ya que se encontraron respuestas diferentes a las que usualmente observamos y estudiamos en las clases, como lo es la respuesta inversa. Se cumplió con determinar el efecto de las manipulaciones en las entradas sobre las variables de salida, que era el objetivo principal del análisis de sensibilidad, así como con proponer los modelos dinámicos que describen el comportamiento de la respuesta registrada por los sensores a lo largo de la columna.

En cuanto a proponer un protocolo experimental para la materia de "Laboratorio de Ingeniería Química IV", el resultado también fue satisfactorio ya que el protocolo propuesto cumple con las expectativas contempladas en el programa de la materia, además de que se tomó como base las propuestas de reforma de enseñanza experimental presentadas por el Dr. Martín Hernández Luna y ,en específico, la idea de que el estudiante debe ir por su propio pie al encuentro del conocimiento apoyado, por supuesto, por el profesor.

A pesar de que los resultados obtenidos son satisfactorios es importante mencionar que lo mejor hubiera sido tener un registro histórico de la composición a lo largo de la columna, pero, como bien se mencionó en el desarrollo de esta tesis, por cuestión de los recursos con los que se cuenta en el laboratorio esto no fue posible.

Algunas cosas que se pueden realizar en base al presente trabajo son:

- Evaluar perturbaciones intermedias a las que se realizaron para mejorar el programa incluido en el anexo 5 y para crear un modelo general de la columna.
- Este trabajo partió totalmente de datos experimentales por lo que se podría realizar el modelo teórico y compararlo con los resultados aquí presentados.
- Estudiar el efecto que tendría la dilución o concentración de la solución absorbente.
- Evaluar la respuesta en términos de la composición a partir de datos de temperatura mediante los balances de materia y energía.

Finalmente, espero con este trabajo haber dejado algo realmente útil para las futuras generaciones de estudiantes de Ingeniería Química y para la enseñanza de la Ingeniería Química en general.

CAPÍTULO 4

PROPUESTA DE PROTOCOLO EXPERIMENTAL

4.1 Antecedentes y justificación

En el programa de la materia "Laboratorio de Ingeniería Química IV" asignada al octavo semestre en el actual plan de estudios de la carrera de Ingeniería Química impartida en esta Facultad, se encuentran asignadas horas de clase al tema de "Dinámica y Control de Procesos". Por desgracia con los protocolos experimentales usados específicamente para el tema antes mencionado no se ha logrado alcanzar el objetivo de enseñanza experimental que se pretende.

Con los nuevos dispositivos de medición instalados en algunos equipos del LIQ, incluida la columna de absorción PIGNAT, es posible tener un registro histórico del comportamiento de las variables, lo cual, como ya se ha mencionado, es vital para realizar el análisis de sensibilidad con el fin de crear modelos dinámicos empíricos que describan a los procesos.

Estos dispositivos de medición están instalados en diferentes equipos como secadores, sistemas de flujo de fluidos, compresores, torres de destilación, entre otros; pero se optó por realizar esta tesis en la columna de absorción PIGNAT debido a la facilidad de operación de ésta, la accesibilidad de los reactivos y la experiencia de los alumnos en la operación.

Lo anterior es para hacer referencia a que es un equipo conocido por los alumnos ya que es utilizado en dos de los protocolos de la materia "Laboratorio de Ingeniería Química III" aunque con fines diferentes a la enseñanza de dinámica y control. Es por esto que los reactivos y materiales necesarios se encuentran disponibles en el laboratorio.

En la materia "LIQ III" se ocupa la columna de absorción PIGNAT para estudiar el comportamiento hidrodinámico de las fases gas-liquido así como el proceso de absorción de CO_2 de aire utilizando una solución acuosa de monoetanolamina, con el fin de determinar los coeficientes de transferencia de masa. Teniendo en cuenta esto, diseñar un protocolo que aborde el tema de dinámica y control utilizando la columna de absorción PIGNAT completaría de manera global el conocimiento del proceso de absorción de CO_2 en MEA, lo que convertiría a este equipo en el primero en ser estudiado de esta manera por los alumnos de Ingeniería Química de esta Facultad.

Por lo mencionado anteriormente se decidió utilizar la columna de absorción PIGNAT y en específico estudiar el proceso de absorción de CO_2 en MEA.

4.2 Protocolo Experimental

a.- Título del protocolo experimental:

“Determinación empírica de parámetros dinámicos”

b.- Objetivo Académico:

“Que los alumnos identifiquen las implicaciones físicas y el papel que juegan la constante tiempo y la ganancia en los modelos que describen el comportamiento dinámico de un proceso, mediante la aplicación del enfoque de la dinámica y control de procesos a un experimento familiar para ellos”.

c.- Problema Planteado:

Por cuestiones particulares del proceso, se requiere que la columna de absorción opere a dos diferentes flujos de solución de MEA al 15% en masa para el mismo flujo de alimentación de mezcla gaseosa CO₂-aire. El flujo de aire indicado en el rotámetro correspondiente es de 20%, mientras que el de CO₂ es de 30mm. Los flujos de alimentación de solución de MEA, con los que operara la columna, son de 3 L/h y 9 L/h; pasando al flujo mayor de manera espontánea.

Proponer los modelos que describan la respuesta dinámica en la temperatura registrada en cada uno de los sensores instalados a lo largo de la columna.

d.- Parte Experimental

d.1.- Medidas de higiene y seguridad

Utilizar lentes de seguridad para el manejo de ácidos, verificar que el indicador PI-2 marque 1 bar (consultar diagrama en el anexo 1) y asegurarse de conectar energía eléctrica al sistema de válvulas y manómetros del tanque de almacenamiento de CO₂ para evitar el congelamiento del sistema.

d.2.- Material

1 bureta automática

3 vasos de precipitados de 100 ml

1 probeta graduada de 100ml

1 pipeta de 5 ml

1 cronómetro

1 propipeta

1 extensión para conectar a la energía eléctrica el manómetro de CO₂

Juego de llaves del cuarto de control

Computadora del módulo móvil de control

Juego de llaves del sistema móvil de control

d.3.- Sustancias

Solución de MEA al 15% en masa

Ácido clorhídrico 1N

Fenolftaleína

CO₂ en tanque de almacenamiento a presión

d.4.- Servicios Auxiliares

Energía eléctrica

Aire a presión

d.5.- Descripción del equipo

El equipo de absorción de gases PIGNAT que se encuentra montado en el Laboratorio de Ingeniería Química (LIQ) de la Facultad de Química de la UNAM, está compuesto por una columna de absorción de vidrio de 0.0508 m de diámetro interno y 1.2 m de altura, está rellena de empaques tipo anillos Raschig de 0.434 cm de diámetro interno, 0.622 cm de diámetro externo y 0.78 cm de longitud, que aportan una superficie de contacto de 813.5 m²/m³. La altura empacada es de 1.06 m. Dentro de la columna hay 5 soportes redistribuidores de líquido sobre los cuales están acopladas válvulas para tomar muestras (V9a-V9e) y transmisores de temperatura (TT-302 –

TT-306) acoplados al sistema de medición y control distribuido del LIQ. Consultar el diagrama de tubería e instrumentación ubicado en el anexo 1.

El líquido que es alimentado a la columna se almacena en un recipiente de plástico de 20L y la alimentación se hace mediante una bomba de tipo dosificadora cuyos controles permiten establecer el flujo. Sobre la línea de alimentación de líquido se encuentra instalado un rotámetro que indica el flujo en L/h (FI-1) y un transmisor de temperatura (TT-301) acoplado al sistema de medición y control distribuido del LIQ para identificar la temperatura de alimentación.

El gas que se alimenta a la columna puede ser aire u otro gas o una mezcla de ambos. El aire alimentado proviene de la red de aire comprimido del LIQ. Sobre la línea de aire está instalado un indicador de presión (PI-1), una válvula que funciona como purga (V1') para eliminar la acumulación de agua condensada en la línea y después otra válvula (V1); seguido de esto está instalada una válvula manual (V2) y un indicador para controlar la presión (PI-2) de alimentación al equipo, después está instalada una válvula (V3) para controlar manualmente el flujo de alimentación; finalmente, antes de que la línea se conecte al tubo de alimentación en el fondo de la columna está instalado un rotámetro que indica el flujo (FI-2) como un porcentaje (en las secciones siguientes se explica cómo determinar el flujo de aire en m³/h a partir de la lectura en el rotámetro). El otro gas (dióxido de carbono) se encuentra almacenado en un tanque cilíndrico de alta presión cercano al

equipo, el tanque tiene un indicador de presión (PI-3) [psi], a la salida del tanque se encuentra instalada una válvula manual (V4) y un indicador para controlar la presión (PI-4) de alimentación al equipo, después están instaladas dos válvulas en serie (V6 y V5) seguidas de otra que funciona como purga (V6') para eliminar el gas que se queda en la tubería una vez terminada la operación del equipo, después está instalada una válvula (V7) para controlar el flujo de alimentación mediante un rotámetro que indica el flujo (FI-3) como una lectura en mm (en las secciones siguientes se explica cómo determinar el flujo de aire en m³/h a partir de la lectura en el rotámetro). Ambas líneas se juntan en una sola sobre la cual está instalada una válvula para tomar muestras (V8) de la mezcla gaseosa de alimentación y un transmisor de temperatura (TT-307) acoplado al sistema de medición y control distribuido del LIQ para identificar la temperatura de alimentación.

Los fluidos pasan a contracorriente dentro de la columna en la cual también está instalado un indicador transmisor de la caída de presión (PDIT-301). En el fondo de la columna, por debajo de la alimentación de gas, se forma una columna hidrostática de líquido con el fin de evitar que el gas se escape por el fondo. Hay una válvula (V10) instalada al final de la columna hidrostática para vaciarla una vez terminada la operación del equipo. El líquido fluye del fondo de la columna hidrostática a un depósito en el fondo del cual está instalada una válvula (V11) para recibir el líquido en un tanque de almacenamiento de plástico de 20L. El gas que sale por el domo de la

columna pasa a una línea la cual se divide en dos. Por un lado está instalada una válvula (V12) que permite liberar el gas directamente al ambiente, por el otro está instalada una válvula (V13) que envía el gas a un depósito en el que el gas se burbujea en líquido absorbente para reducir la concentración del soluto. Este depósito se llena de manera manual, en el fondo tiene instalada una válvula (V14) para vaciar el líquido, el gas burbujeado sale libremente al ambiente.

d.7.- Desarrollo experimental

1.- Encender la computadora principal ubicada en el cuarto de control y seguir el procedimiento descrito en el anexo 2 para crear una gráfica de visualización de las variables en tiempo real.

2.- Conectar la laptop del módulo móvil de control, instalarlo cerca del área de trabajo y seguir el procedimiento descrito en el anexo 2 para crear una gráfica de visualización de las variables en tiempo real. Recubrir la columna con el material aislante.

3.- Encender la compresora del laboratorio y recorrer visualmente la línea de aire que llega hasta la válvula V1 de la entrada a la columna PIGNAT.

4.- Purgar el aire que proviene de la compresora usando la válvula V1' antes de alimentarlo a la columna. Una vez hecho esto abrir la válvula V2 hasta que el indicador PI-2 marque un bar.

5.- Purgar la línea de CO₂ con la válvula V6'. Conectar la clavija usando la extensión eléctrica al sistema de válvulas e indicadores de presión del tanque de almacenamiento de CO₂. Abrir la válvula V4 hasta que el indicador PI-4 Marque 20 psi. Abrir las válvulas V5 y V6 totalmente.

6.- Tomar tres alícuotas de 4 ml de la solución acuosa de MEA al 15% en masa y titularlas con el HCl 1N. Anotar los resultados en la Tabla A.

7.- Verificar que las válvulas V9a-V9e y V10 estén cerradas, que la válvula V11 esté totalmente abierta y que haya un depósito para recibir el flujo de líquido a la salida. Conectar a la energía eléctrica la bomba peristáltica y comenzar a alimentar la solución de MEA a un flujo de 3 L/h (consultar instrucciones de uso de la bomba en el anexo 3).

8.- Una vez que se tenga flujo de líquido a la salida, verificar tres veces el flujo utilizando la probeta graduada y el cronómetro. Anotar los resultados en la Tabla B.

9.- Una vez que la temperatura en la columna haya alcanzado una temperatura uniforme (consultar el monitor del módulo móvil de control) comenzar a alimentar la mezcla gaseosa. Verificar que la válvula V12 esté totalmente abierta. Abrir la válvula V3 hasta que el indicador FI-2 marque 20% y la válvula V7 hasta que el indicador FI-3 marque 30mm. Esta operación debe ser simultánea y no durar más de 5 segundos.

10.- Observar el comportamiento de la temperatura en la columna. Una vez que la temperatura haya alcanzado el estado estacionario, anotar los valores indicados por cada sensor en la Tabla C. Proceder a aumentar el flujo de solución de MEA a 6 L/h (consultar instrucciones de uso de la bomba en el anexo 3). Anotar el tiempo en el que se realizó esta perturbación. Verificar el flujo real de la solución de MEA a la salida como se indicó en el paso 8 y llenar la Tabla D.

11.- Observar el comportamiento de la temperatura en la columna. Una vez que la temperatura haya alcanzado un nuevo estado estacionario llenar la Tabla E con los datos solicitados.

Paro del equipo.

1.- Apagar la bomba de alimentación de solución de MEA y descontarla de la corriente eléctrica.

2.- Cerrar la válvula V-1 de alimentación de aire. No olvidar apagar la compresora del laboratorio.

3.- Cerrar las válvulas del tanque de CO₂ y desconectar el cable de corriente

4.- Verificar que todas las válvulas del equipo y del tanque de CO₂ se encuentren cerradas y todas las conexiones eléctricas desconectadas.

d.8.- Información Experimental

Tabla A.- Determinación del % en masa de MEA en la alimentación	
Mililitros gastados de HCl 1N	% en masa de MEA

Utilizar la siguiente ecuación para determinar el % en masa de MEA:

$$\text{MEA [\% peso]} = \left(\frac{\text{mL gastados de HCl 1N}}{4} * 6.064 \right) + 0.0231$$

Tabla B.- Flujo Inicial de solución de MEA		
Tiempo [segundos]	Volumen [mL]	Flujo [L/h]

Tabla C.- Estado estacionario original [°C]						
TT-301	TT-302	TT-303	TT-304	TT-305	TT-306	TT-307

Para determinar el flujo de CO₂ y aire en m³/h utilizar las siguientes ecuaciones:

$$\text{Flujo de Aire} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] = \frac{\frac{\text{lectura en el rotámetro} * 0.072 * 28.95}{22.4}}{(-0.0035 * \text{temp. de alim. del aire [}^\circ\text{C]}) + 1.2791}$$

$$\text{Flujo de CO}_2 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] = \frac{0.0144 * \text{lectura en el rotámetro}}{(-0.0053 * \text{temp. de alim. del CO}_2 \text{ [}^\circ\text{C]}) + 1.9547}$$

La temperatura de alimentación tanto de aire como de CO₂ es el valor indicado en la tabla C para el indicador TT-307.

d.9.- Cálculos

Con el dato de la hora en la cual se realizó la modificación del flujo de solución de MEA y los valores de la tabla E completar la siguiente tabla.

Tabla F.- Comportamiento dinámico de la temperatura [°C] como variable de desviación.					
Tiempo [segundos]	TT-302'	TT-303'	TT-304'	TT-305'	TT-306'

Proponer los modelos que describan el comportamiento dinámico de la temperatura registrada en cada uno de los sensores instalados a lo largo de la columna ante la perturbación realizada mediante el método de curva de respuesta (considerar únicamente modelos de primer y segundo ordenes).

Anotar los parámetros que conforman cada modelo en la siguiente tabla.

Tabla G.- Colección de datos de los modelos		
Indicador	Modelo	Parámetros
TT-302		
TT-303		
TT-304		
TT-305		
TT-306		

Hacer 5 gráficas comparativas de temperatura de desviación vs tiempo que muestren los datos originales y el modelo que mejor los describe para cada uno de los registros de los sensores instalados a lo largo de la columna.

d.10.- Cuestionario

1.- ¿A qué cree que se deba el comportamiento que se muestra en la temperatura registrada por los sensores instalados a lo largo de la columna ante la perturbación realizada?

2.- ¿Cuál cree que sería el efecto si la perturbación fuera de mayor magnitud?

3.- ¿Y si fuera de menor magnitud?

4.- ¿Cuál es el significado físico de la constante tiempo?

5.- Según los valores obtenidos de la constante tiempo en los modelos propuestos y lo que observa en las gráficas de curva de respuesta ¿Cómo es el comportamiento de la respuesta ante la perturbación realizada?

6.- ¿A qué cree que se deba que la respuesta tenga esa característica en cuanto a dinámica se refiere?

7.- ¿Cuál es el significado físico de la ganancia?

8.- Según los valores obtenidos de ganancia en los modelos propuestos y lo que puede observar en las gráficas de curva de respuesta, ¿Qué características tiene la respuesta ante la perturbación realizada?

9.- ¿A qué cree que se deba que la respuesta tenga esa característica en cuanto a sensibilidad se refiere?

10.- ¿Se presenta el fenómeno de tiempo muerto en la respuesta registrada por los sensores? De ser así, ¿Cómo es el comportamiento del tiempo muerto a lo largo de la columna (hacer una gráfica)?

11.- ¿A qué cree que se deba ese comportamiento del tiempo muerto?

12.- ¿Cuáles son los modelos que describen la respuesta dinámica en la temperatura registrada en cada uno de los sensores instalados a lo largo de la columna?

d.11.- Referencias Bibliográficas

Ogata, Katsuihiko

Ingeniería de control moderna.

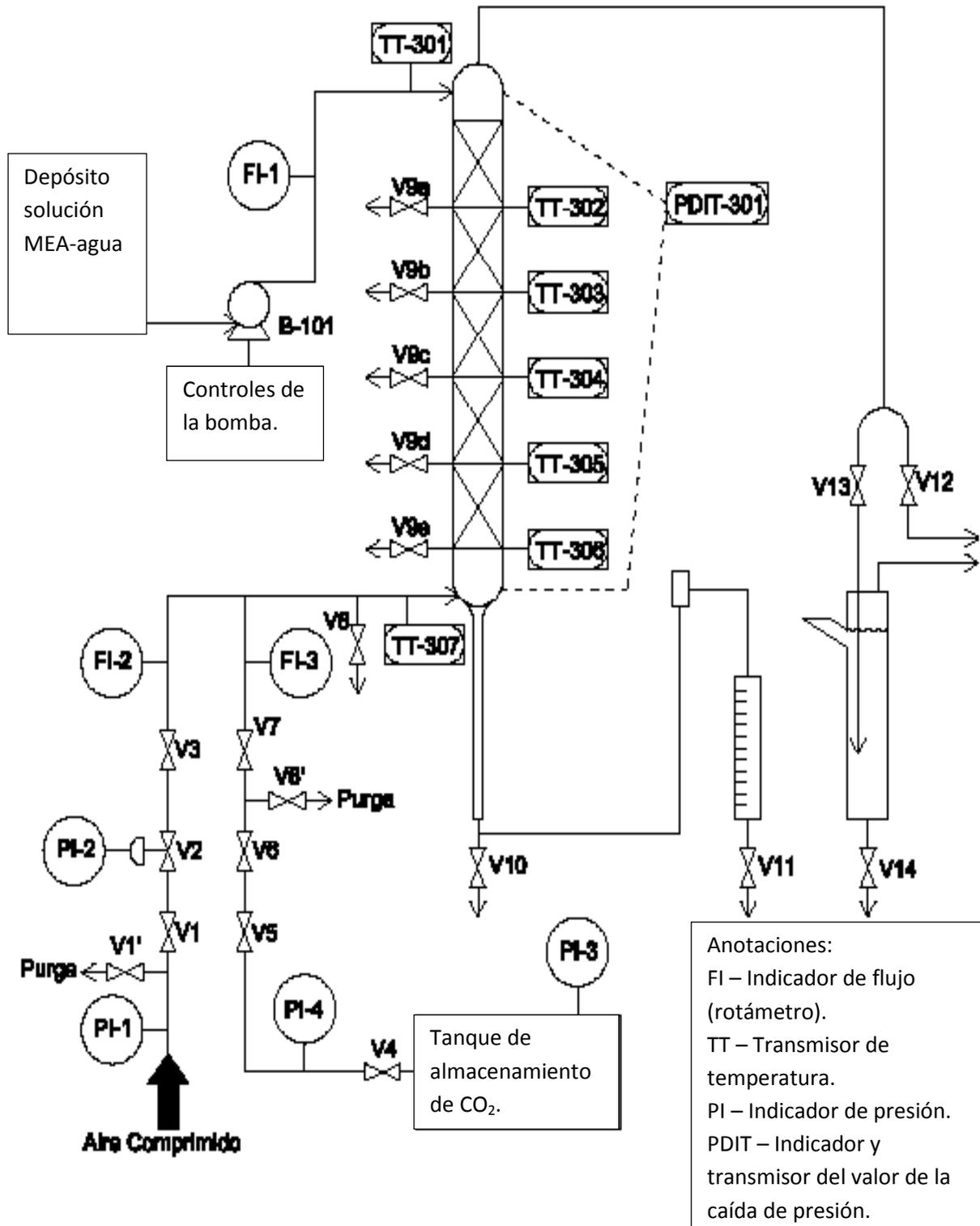
México, Prentice Hall, 1988, Tercera Edición.

Stephanopoulos, George

Chemical process control: an introduction to theory and practice.

New Jersey, Prentice Hall, 1984.

Anexo 1.- Diagrama Simplificado de tubería e instrumentación de la Columna de Absorción Empacada PIGNAT



Anexo 2.- Instrucciones de uso del software y hardware de control de instrumentos para la visualización de variables de proceso en tiempo real.

Material y Equipo:

Juego de llaves del cuarto de control de instrumentos.

Laptop para el sistema móvil de control de instrumentos.

Juego de llaves del sistema móvil de control de instrumentos.

Instrucciones de Uso:

- 1.- Encender la computadora principal ubicada en el cuarto de control de instrumentos.
- 2.- Una vez encendida ingresar la contraseña solicitada.
- 3.- Al ingresar la contraseña el usuario tendrá acceso al escritorio de trabajo de Windows.
- 4.- En el escritorio de trabajo de Windows dar doble clic al icono con el nombre "DeltaV Operate"
- 5.- Se abrirá el software con la interfaz de usuario para la visualización de variables de proceso en tiempo real.
- 6.- Dar clic en el botón marcado con el siguiente símbolo:



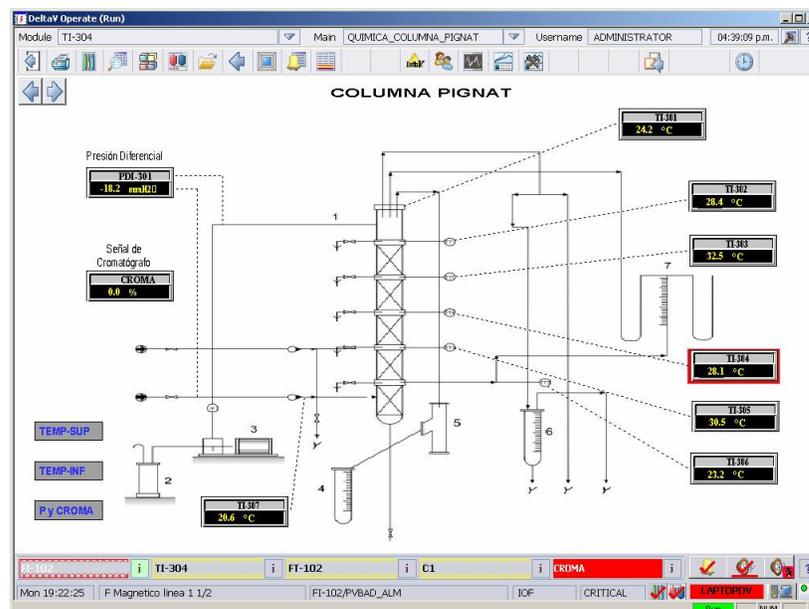
ubicado en la esquina superior izquierda de la pantalla.

7.- Al dar clic en dicho botón se abrirá un menú en el que aparece la lista de los equipos en los cuales se encuentra instalada la instrumentación.



8.- Dar clic en el icono ubicado al lado del nombre del equipo que se desea visualizar.

9.- Al dar clic se abrirá de nuevo la interfaz de usuario para la visualización de variables de proceso en tiempo real en la que ahora aparecerá un diagrama o foto del equipo seleccionado en el cual se aprecia la ubicación de cada indicador en el equipo así como el valor en tiempo real de la variable que está transmitiendo cada indicador. La pantalla es como se muestra a continuación:



10.- Una vez que se ha hecho esto se puede proceder a usar el equipo móvil de control de instrumentos.

11.- Quitar las trabas a las ruedas del equipo y acercarlo al lugar donde se va a trabajar.

12.- Conectar la extensión con la que cuenta el equipo a la corriente eléctrica.

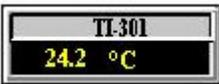
13.- Conectar la laptop a la electricidad y el cable VGA entre el monitor y la laptop.

14.- Encender el monitor y la laptop.

15.- Seguir los pasos 1-9 en la laptop para acceder a la interfaz de usuario para la visualización de variables de proceso en tiempo real.

Para crear una gráfica en la que aparezcan los datos históricos de una o varias variables de procesos realizar los pasos siguientes:

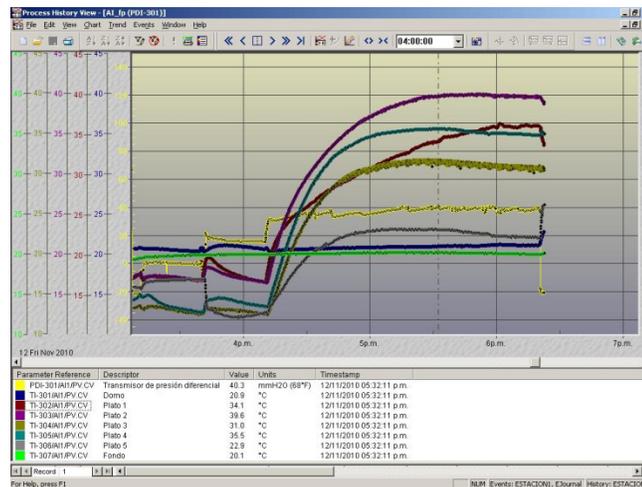
1.- Una vez que se está en la interfaz de usuario para la visualización de variables de proceso en tiempo real de algún equipo, dar doble clic sobre el indicador del instrumento del cual se desea crear una gráfica histórica de la variable de proceso. Estos indicadores tienen la

siguiente forma: 

2.- Al hacer esto se abrirá un menú con las opciones de dicho indicador.

3.- En este menú, dar clic en el botón con la siguiente imagen: 

4.- Esto abrirá una ventana con el nombre de "Process History View" en el que aparece una línea que representa el valor de la variable seleccionada a lo largo del tiempo. La ventana tiene la siguiente forma:



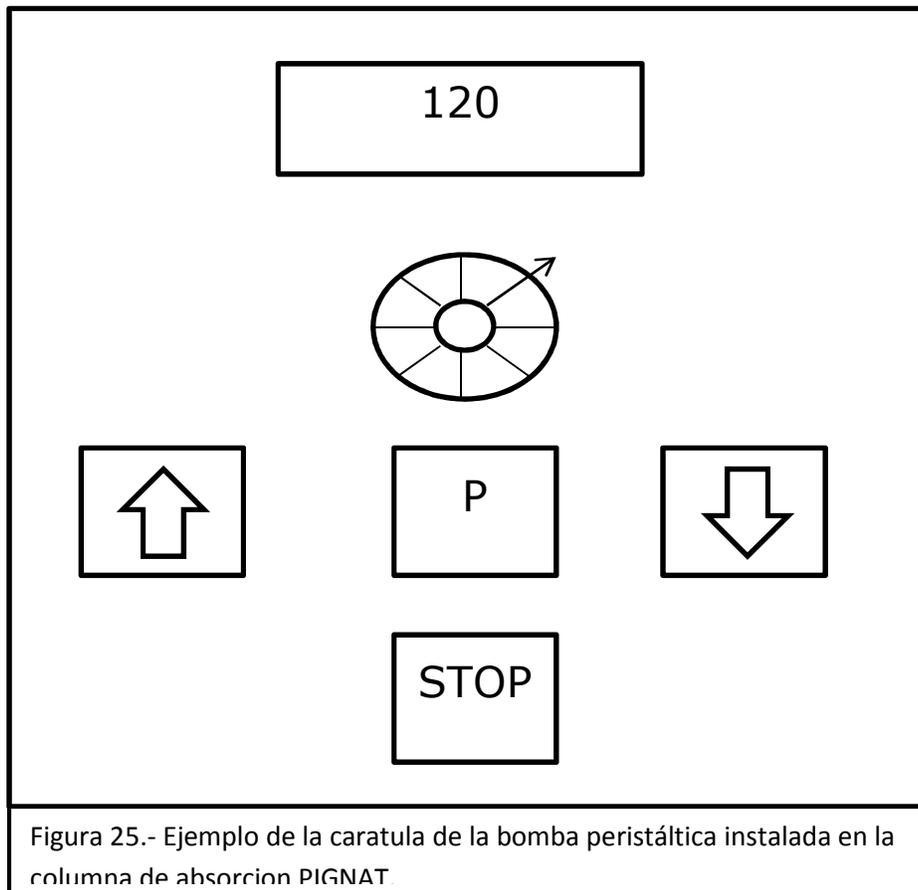
5.- Para agregar más variables al gráfico histórico dar clic en el botón con el símbolo . Esto abrirá una ventana nueva, dar clic en buscar, y seleccionar la variable que se desea agregar al gráfico histórico.

6.- Si se da clic sobre algún punto de la gráfica aparecerá una línea punteada y en la parte inferior se marcará la hora y el valor de dicha variable en ese punto de la gráfica.

7.- Para visualizar el valor actual de las variables, dar clic en la gráfica en la zona donde no hay valores, esto hará que automáticamente se muestren los valores actuales en tiempo real de cada variable en la tabla de la parte inferior.

Anexo 3.- Instrucciones de uso de la bomba peristáltica

Los controles de la bomba son como los que se muestran en el siguiente dibujo.



- 1.- Encender la bomba con el botón "P".
- 2.- Girar la perilla hasta la posición de cero.
- 3.- Las flechas indican el número de pulsaciones del pistón, seleccionar el valor de 120 pulsando la flecha correspondiente. Esto para que el flujo sea lo más constante posible.
- 4.- La perilla controla el desplazamiento del pistón. Girarla hasta lograr que la alimentación sea de 3 L/h según el rotámetro correspondiente (FI-1).
- 5.- Para hacer una modificación en el flujo solamente girar la perilla hasta que se obtenga el flujo deseado. Recuerde que las para el caso particular de este experimento, debe de alcanzar el valor de 6 l/h en el rotámetro FI-1 y no debe de tardar más de 5 segundos en hacer esta modificación.

Anexo 4.- Colección de Resultados Experimentales y Ajuste de Modelos

En las siguientes tablas, la columna nombrada con el título del transmisor seguido por un apóstrofo se refiere a los datos experimentales ya expresados como variables de desviación. Es posible conocer el valor original de los datos experimentales tomando en cuenta la explicación realizada en la sección 1.4 y la Tabla 7 que contiene los valores en el estado estacionario original. Las siguientes columnas se nombraron con el título del transmisor y entre paréntesis las siglas correspondientes al modelo que se ajustó, a un lado de cada una de éstas está una columna que expresa la diferencia cuadrática entre el modelo y los datos originales (consultar el índice de acrónimos para mayores referencias). En las tablas también se muestra el valor total de la diferencia cuadrática así como el valor de los parámetros que conforman el modelo dinámico. En las tablas se encuentran sombreados los datos originales así como el modelo que mejor los describe. Las unidades de los valores de cada sensor son [°C] mientras que el tiempo esta expresado en segundos.

Perturbaciones en el flujo de alimentación de solución MEA-agua.

Perturbación de 2.09 L/h.

Para el transmisor TT-302.

Tabla A4-1.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-302 ante una perturbación de 2.09 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.							
t [segundos]	TT-302'	TT-302 (MPO)	DC	TT-302 (MSO-CA)	DC	TI-302 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
24	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
60	-0.200	-0.897	0.486	-0.128	0.005	-0.140	0.004
141	-1.800	-2.752	0.907	-1.132	0.446	-1.214	0.344
261	-3.900	-5.015	1.243	-3.444	0.208	-3.593	0.094
412	-6.500	-7.204	0.496	-6.421	0.006	-6.540	0.002
481	-7.400	-8.009	0.371	-7.602	0.041	-7.683	0.080
641	-9.500	-9.507	0.000	-9.782	0.079	-9.766	0.071
792	-11.000	-10.551	0.202	-11.187	0.035	-11.104	0.011
957	-12.100	-11.389	0.505	-12.175	0.006	-12.058	0.002
1113	-12.800	-11.969	0.690	-12.750	0.002	-12.629	0.029
1269	-13.200	-12.397	0.645	-13.100	0.010	-12.991	0.044
1420	-13.500	-12.704	0.634	-13.304	0.038	-13.213	0.082
1682	-13.600	-13.062	0.289	-13.483	0.014	-13.425	0.031
1829	-13.600	-13.196	0.163	-13.531	0.005	-13.487	0.013
2096	-13.600	-13.360	0.058	-13.574	0.001	-13.550	0.003
		Total	6.690	Total	0.896	Total	0.807
		Escalón	2.091	Escalón	2.091	Escalón	2.091
		B	-13.600	B	-13.600	B	-13.600
		Kp	-6.505	Kp	-6.505	Kp	-6.505
		τ_p	512.985	τ_p	243.268	τ_p	230.979
		td	25.000	td	25.000	td	25.000
				ζ	1.000	ζ	1.064

Para el transmisor TT-303

Tabla A4-2.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-303 ante una perturbación de 2.09 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.			
T [segundos]	TT-303'	TT-303 (MRI)	DC
0	0.000	0.000	0.000
24	0.000	0.000	0.000
60	0.200	0.391	0.037
141	0.500	0.966	0.218
261	0.800	0.913	0.013
412	0.000	0.003	0.000
481	-0.400	-0.561	0.026
641	-1.800	-1.966	0.028
792	-3.000	-3.239	0.057
957	-4.100	-4.451	0.123
1113	-5.300	-5.393	0.009
1269	-6.400	-6.145	0.065
1420	-7.000	-6.715	0.081
1682	-7.900	-7.410	0.240
1829	-8.100	-7.676	0.180
2096	-8.200	-8.004	0.038
		Total	1.342
		Escalón	2.091
		τ_1	351.613
		K1	28.985
		τ_2	438.660
		K2	33.030
		td	30.000

Para el Transmisor TT-304

Tabla A4-3.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-304 ante una perturbación de 2.09 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.			
T [segundos]	TI-304'	TI-304 (MRI)	DC
0	0.000	0.000	0.000
24	0.000	0.000	0.000
60	0.300	0.234	0.004
141	0.800	0.886	0.007
261	1.300	1.593	0.086
412	2.100	2.152	0.003
481	2.200	2.314	0.013
641	2.400	2.526	0.016
792	2.900	2.576	0.105
957	2.800	2.527	0.075
1113	2.500	2.419	0.006
1269	2.600	2.281	0.101
1420	2.100	2.135	0.001
1682	1.800	1.882	0.007
1829	1.500	1.750	0.063
2096	1.000	1.537	0.289
		Total	0.848
		Escalón	2.091
		τ_1	604.152
		K1	16.438
		τ_2	711.238
		K2	16.046
		td	35.000

Para el Transmisor TT-305

Tabla A4-4.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-305 ante una perturbación de 2.09 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.							
T [segundos]	TT-305'	TT-305 (MPO)	DC	TT-305 (MSO-CA)	DC	TT-305 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
24	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
60	0.100	0.300	0.040	0.014	0.007	0.014	0.007
141	1.400	2.505	1.221	0.908	0.242	0.908	0.242
261	3.900	5.132	1.517	3.466	0.188	3.466	0.188
412	6.700	7.595	0.800	6.809	0.012	6.809	0.012
481	7.700	8.477	0.603	8.105	0.164	8.105	0.164
641	10.100	10.076	0.001	10.412	0.098	10.412	0.098
792	11.700	11.150	0.303	11.818	0.014	11.818	0.014
957	13.100	11.982	1.250	12.748	0.124	12.748	0.124
1113	13.800	12.536	1.599	13.255	0.297	13.255	0.297
1269	14.000	12.930	1.146	13.544	0.208	13.544	0.208
1420	13.800	13.202	0.357	13.702	0.010	13.702	0.010
1682	14.000	13.506	0.244	13.830	0.029	13.830	0.029
1829	13.900	13.614	0.082	13.861	0.001	13.861	0.002
2096	13.900	13.741	0.025	13.887	0.000	13.887	0.000
		Total	9.188	Total	1.394	Total	1.394
		Escalón	2.091	Escalón	2.091	Escalón	2.091
		B	13.900	B	13.900	B	13.900
		Kp	6.649	Kp	6.649	Kp	6.649
		τ_p	457.952	τ_p	219.893	τ_p	219.891
		td	50.000	td	50.000	td	50.000
				ζ	1.000	ζ	1.000

Para el Transmisor TT-306

Tabla A4-5.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-306 ante una perturbación de 2.09 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.							
T [segundos]	TI-306'	TI-306 (MPO)	DC	TI-306 (MSO-CA)	DC	TI-306 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
24	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
60	0.100	0.000	0.010	0.000	0.010	0.000	0.010
141	1.200	1.777	0.332	0.480	0.518	0.769	0.186
261	3.200	4.006	0.649	2.254	0.895	3.002	0.039
412	5.600	6.247	0.418	4.991	0.371	5.720	0.014
481	6.800	7.098	0.089	6.189	0.373	6.770	0.001
641	8.600	8.734	0.018	8.589	0.000	8.746	0.021
792	9.800	9.925	0.016	10.306	0.256	10.125	0.106
957	11.000	10.927	0.005	11.641	0.410	11.230	0.053
1113	11.700	11.652	0.002	12.497	0.635	11.991	0.085
1269	12.700	12.211	0.239	13.069	0.137	12.550	0.022
1420	13.300	12.630	0.448	13.435	0.018	12.950	0.123
1682	14.000	13.149	0.723	13.795	0.042	13.415	0.343
1829	14.200	13.356	0.713	13.905	0.087	13.587	0.375
2096	14.100	13.622	0.228	14.014	0.007	13.797	0.092
		Total	3.892	Total	3.761	Total	1.470
		Escalón	2.091	Escalón	2.091	Escalón	2.091
		B	14.100	B	14.100	B	14.100
		Kp	6.745	Kp	6.745	Kp	6.745
		τ_p	601.441	τ_p	282.472	τ_p	205.340
		td	60.000	td	60.000	td	60.000
				ζ	1.000	ζ	1.436

Perturbación de 5.94 L/h.

Para el Transmisor TT-302

Tabla A4-6.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-302 ante una perturbación de 5.94 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.							
T [segundos]	TT-302'	TT-302 (MPO)	DC	TT-302 (MSO-CA)	DC	TT-302 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.100	0.000	0.010	0.000	0.010	0.000	0.010
14	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
23	-0.200	-0.454	0.065	-0.028	0.030	-0.454	0.065
32	-0.700	-0.951	0.063	-0.122	0.334	-0.951	0.063
41	-1.300	-1.432	0.017	-0.273	1.054	-1.432	0.017
54	-2.200	-2.102	0.010	-0.578	2.632	-2.102	0.010
72	-3.300	-2.983	0.101	-1.133	4.698	-2.983	0.101
94	-4.400	-3.989	0.169	-1.962	5.942	-3.989	0.169
151	-6.800	-6.272	0.279	-4.485	5.359	-6.272	0.279
249	-9.600	-9.301	0.090	-8.713	0.787	-9.301	0.090
315	-11.000	-10.842	0.025	-10.986	0.000	-10.842	0.025
399	-12.400	-12.366	0.001	-13.130	0.533	-12.366	0.001
470	-13.200	-13.356	0.024	-14.389	1.414	-13.356	0.024
532	-13.800	-14.046	0.060	-15.171	1.878	-14.046	0.060
603	-14.400	-14.677	0.077	-15.796	1.948	-14.677	0.077
660	-14.800	-15.085	0.081	-16.145	1.810	-15.085	0.081
753	-15.300	-15.602	0.091	-16.517	1.481	-15.602	0.091
832	-15.600	-15.930	0.109	-16.705	1.221	-15.930	0.109
952	-16.000	-16.287	0.082	-16.863	0.744	-16.287	0.082
1177	-16.500	-16.667	0.028	-16.968	0.219	-16.667	0.028
1474	-16.800	-16.878	0.006	-16.996	0.038	-16.878	0.006
1646	-16.900	-16.932	0.001	-16.999	0.010	-16.932	0.001
1805	-16.900	-16.960	0.004	-17.000	0.010	-16.960	0.004
1920	-17.000	-16.973	0.001	-17.000	0.000	-16.973	0.001
2106	-17.000	-16.986	0.000	-17.000	0.000	-16.986	0.000
2243	-17.000	-16.991	0.000	-17.000	0.000	-16.991	0.000
2367	-17.000	-16.994	0.000	-17.000	0.000	-16.994	0.000
		Total	1.393	Total	32.154	Total	1.393
		Escalón	5.942	Escalón	5.942	Escalón	5.942
		B	-17.000	B	-17.000	B	-17.000
		Kp	-2.861	Kp	-2.861	Kp	-2.861
		τ_p	295.432	τ_p	136.153	τ_p	0.149
		td	15.000	td	15.000	td	15.000
				ζ	1.000	ζ	990.592

Para el Transmisor TT-303

Tabla A4-7.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-303 ante una perturbación de 5.94 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.			
T [segundos]	TI-303'	TI-303 (MRI)	DC
0.000	0.000	0.000	0.000
5.000	0.100	0.000	0.010
14.000	0.000	0.000	0.000
23.000	0.100	0.000	0.010
32.000	0.600	0.353	0.061
41.000	0.900	0.711	0.036
54.000	1.200	1.062	0.019
72.000	1.300	1.286	0.000
94.000	1.200	1.249	0.002
151.000	0.000	0.211	0.045
249.000	-2.400	-2.629	0.053
315.000	-4.300	-4.500	0.040
399.000	-6.100	-6.542	0.196
470.000	-7.600	-7.954	0.126
532.000	-8.900	-8.977	0.006
603.000	-10.100	-9.942	0.025
660.000	-10.600	-10.583	0.000
753.000	-11.300	-11.421	0.015
832.000	-11.800	-11.972	0.029
952.000	-12.600	-12.594	0.000
1177.000	-13.600	-13.300	0.090
1474.000	-13.700	-13.732	0.001
1646.000	-13.900	-13.853	0.002
1805.000	-14.000	-13.922	0.006
1920.000	-14.600	-13.954	0.417
2106.000	-14.300	-13.988	0.097
2243.000	-13.900	-14.003	0.011
2367.000	-13.800	-14.013	0.045
		Total	1.558
		Escalón	5.942
		τ_1	72.916
		K1	1.532
		τ_2	333.771
		K2	3.894
		td	25.000

Para el Transmisor TT-304

Tabla A4-8.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-304 ante una perturbación de 5.94 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.			
T [segundos]	TI-304'	TI-304 (MRI)	DC
0	0.000	0.000	0.000
5	-0.100	0.000	0.010
14	0.100	0.000	0.010
23	0.000	0.000	0.000
32	0.000	0.000	0.000
41	0.400	0.272	0.016
54	1.200	0.801	0.159
72	1.800	1.409	0.153
94	2.100	1.983	0.014
151	2.600	2.813	0.045
249	2.700	2.907	0.043
315	2.200	2.498	0.089
399	1.800	1.760	0.002
470	1.300	1.074	0.051
532	0.200	0.477	0.077
603	0.100	-0.176	0.076
660	-0.500	-0.669	0.028
753	-1.200	-1.404	0.042
832	-2.100	-1.961	0.019
952	-2.700	-2.696	0.000
1177	-3.600	-3.769	0.029
1474	-4.600	-4.729	0.017
1646	-5.100	-5.117	0.000
1805	-5.600	-5.395	0.042
1920	-5.700	-5.559	0.020
2106	-6.000	-5.770	0.053
2243	-6.200	-5.892	0.095
2367	-6.200	-5.982	0.048
		Total	1.264
		Escalón	5.942
		τ_1	122.662
		K1	1.438
		τ_2	659.679
		K2	2.518
		td	35.000

Para el Transmisor TT-305

Tabla A4-9.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-305 ante una perturbación de 5.94 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.			
T [segundos]	TT-305'	TT-305 (MRI)	DC
0	0.000	0.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000
14	0.000	0.000	0.000
23	0.000	0.000	0.000
32	0.000	0.000	0.000
41	0.100	0.000	0.010
54	0.200	0.245	0.002
72	0.900	1.292	0.154
94	1.900	2.454	0.306
151	4.300	4.923	0.388
249	7.200	7.701	0.251
315	8.600	8.785	0.034
399	9.500	9.509	0.000
470	9.800	9.702	0.010
532	9.900	9.646	0.064
603	9.700	9.398	0.091
660	9.400	9.097	0.092
753	8.600	8.484	0.013
832	8.100	7.897	0.041
952	7.000	6.969	0.001
1177	5.300	5.338	0.001
1474	3.500	3.655	0.024
1646	2.700	2.940	0.058
1805	2.100	2.426	0.106
1920	1.900	2.127	0.051
2106	1.400	1.750	0.123
2243	1.300	1.541	0.058
2367	1.200	1.391	0.036
		Total	2.368
		Escalón	5.942
		τ_1	367.884
		K1	16.263
		τ_2	477.170
		K2	16.124
		td	50.000

Para el Transmisor TT-306

Tabla A4-10.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-306 ante una perturbación de 5.94 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.			
T [segundos]	TT-306'	TT-306 (MRI)	DC
0	0.000	0.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000
14	0.000	0.000	0.000
23	0.000	0.000	0.000
32	0.000	0.000	0.000
41	-0.100	0.000	0.010
54	0.000	0.000	0.000
72	0.100	0.324	0.050
94	0.700	1.287	0.345
151	2.800	3.423	0.389
249	5.800	6.096	0.087
315	7.300	7.340	0.002
399	8.400	8.442	0.002
470	9.100	9.049	0.003
532	9.400	9.394	0.000
603	9.600	9.628	0.001
660	9.800	9.718	0.007
753	9.800	9.731	0.005
832	9.700	9.649	0.003
952	9.400	9.425	0.001
1177	8.900	8.875	0.001
1474	8.200	8.178	0.000
1646	7.900	7.850	0.002
1805	7.500	7.602	0.010
1920	7.300	7.454	0.024
2106	7.200	7.261	0.004
2243	7.000	7.151	0.023
2367	6.900	7.071	0.029
		Total	1.066
		Escalón	5.942
		τ_1	384.930
		K1	10.210
		τ_2	487.331
		K2	9.075
		td	65.000

Perturbación de 11.83 L/h.

Para el transmisor TT-302.

Tabla A4-11.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-302 ante una perturbación de 11.83 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.							
T [segundos]	TT-302'	TT-302 (MPO)	DC	TT-302 (MSO-CA)	DC	TT-302 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
26	-0.200	-0.726	0.277	-0.125	0.006	-0.726	0.277
44	-1.000	-1.822	0.676	-0.742	0.066	-1.822	0.676
66	-2.400	-3.021	0.385	-1.896	0.254	-3.021	0.385
93	-4.300	-4.304	0.000	-3.532	0.590	-4.304	0.000
124	-6.100	-5.558	0.294	-5.368	0.536	-5.558	0.294
169	-7.700	-7.032	0.446	-7.600	0.010	-7.032	0.446
226	-8.800	-8.440	0.130	-9.564	0.584	-8.440	0.130
333	-9.900	-10.130	0.053	-11.362	2.139	-10.130	0.053
440	-10.500	-11.060	0.314	-11.954	2.113	-11.060	0.314
614	-11.300	-11.768	0.219	-12.169	0.756	-11.768	0.219
823	-11.700	-12.065	0.134	-12.198	0.248	-12.065	0.134
965	-11.900	-12.139	0.057	-12.200	0.090	-12.139	0.057
1161	-12.000	-12.180	0.032	-12.200	0.040	-12.180	0.032
1370	-12.100	-12.194	0.009	-12.200	0.010	-12.194	0.009
1504	-12.200	-12.197	0.000	-12.200	0.000	-12.197	0.000
1619	-12.200	-12.198	0.000	-12.200	0.000	-12.198	0.000
		Total	3.025	Total	7.442	Total	3.025
		Escalón	11.828	Escalón	11.828	Escalón	11.828
		B	-12.200	B	-12.200	B	-12.200
		Kp	-1.031	Kp	-1.031	Kp	-1.031
		τ_p	179.271	τ_p	72.986	τ_p	0.179
		td	15.000	td	15.000	td	15.000
				ζ	1.000	ζ	499.982

Para el Transmisor TT-303.

Tabla A4-12.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-303 ante una perturbación de 11.83 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.			
T [segundos]	TT-303'	TT-303 (MRI)	DC
0	0.000	0.000	0.000
26	0.100	0.560	0.212
44	0.700	0.640	0.004
66	-0.300	-0.605	0.093
93	-2.000	-2.512	0.262
124	-4.900	-4.523	0.142
169	-7.800	-6.875	0.855
226	-9.000	-9.039	0.002
333	-11.100	-11.474	0.140
440	-12.100	-12.700	0.360
614	-13.200	-13.535	0.112
823	-13.600	-13.836	0.056
965	-13.700	-13.899	0.040
1161	-14.000	-13.930	0.005
1370	-14.100	-13.939	0.026
1504	-14.100	-13.941	0.025
1619	-14.100	-13.942	0.025
		Total	2.457
		Escalón	11.828
		τ_1	18.076
		K1	0.375
		τ_2	155.889
		K2	1.554
		td	20.000

Para el Transmisor TT-304.

Tabla A4-13.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-304 ante una perturbación de 11.83 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.			
T [segundos]	TT-304'	TT-304 (MRI)	DC
0	0.000	0.000	0.000
26	0.100	0.000	0.010
44	0.000	0.000	0.000
66	1.400	1.787	0.150
93	2.100	1.733	0.135
124	1.500	1.192	0.095
169	0.200	0.179	0.000
226	-1.300	-1.060	0.058
333	-3.500	-2.941	0.313
440	-4.200	-4.313	0.013
614	-5.700	-5.791	0.008
823	-6.500	-6.799	0.090
965	-6.900	-7.201	0.091
1161	-7.300	-7.539	0.057
1370	-7.800	-7.736	0.004
1504	-8.000	-7.811	0.036
1619	-8.000	-7.856	0.021
		Total	1.090
		Escalón	11.828
		τ_1	30.981
		K1	0.375
		τ_2	335.297
		K2	1.049
		td	30.000

Para el Transmisor TT-305.

Tabla A4-14.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-305 ante una perturbación de 11.83 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.			
T [segundos]	TT-305'	TT-305 (MRI)	DC
0	0.000	0.000	0.000
26	0.000	0.000	0.000
44	0.000	0.000	0.000
66	0.500	1.260	0.577
93	2.300	2.747	0.200
124	3.800	3.707	0.009
169	4.700	4.143	0.310
226	4.000	3.757	0.059
333	1.600	1.973	0.139
440	-0.200	0.098	0.089
614	-2.000	-2.134	0.018
823	-3.400	-3.598	0.039
965	-4.000	-4.125	0.016
1161	-4.400	-4.522	0.015
1370	-4.800	-4.723	0.006
1504	-4.900	-4.790	0.012
1619	-4.900	-4.826	0.005
		Total	1.495
		Escalón	11.828
		τ_1	104.067
		K1	1.537
		τ_2	269.270
		K2	1.951
		td	50.000

Para el Transmisor TT-306.

Tabla A4-15.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-306 ante una perturbación de 11.83 L/h en el flujo de alimentación de solución de MEA-agua.			
T [segundos]	TT-306'	TT-306 (MRI)	DC
0	0.000	0.000	0.000
26	0.000	0.000	0.000
44	0.000	0.000	0.000
66	0.300	0.417	0.014
93	1.400	2.015	0.378
124	2.700	3.372	0.451
169	4.700	4.651	0.002
226	6.100	5.457	0.413
333	6.000	5.626	0.140
440	4.900	5.088	0.035
614	3.700	4.042	0.117
823	3.000	3.192	0.037
965	2.800	2.866	0.004
1161	2.600	2.625	0.001
1370	2.500	2.512	0.000
1504	2.500	2.477	0.001
1619	2.500	2.460	0.002
		Total	1.616
		Escalón	11.828
		τ_1	169.025
		K1	4.206
		τ_2	212.394
		K2	4.000
		td	60.000

Perturbaciones en el flujo de alimentación de CO₂.

Perturbación de 0.51 m³/h.

Para el Transmisor TT-302.

Tabla A4-16.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-302 ante una perturbación de 0.53 m ³ /h en el flujo de alimentación de CO ₂ .			
T [segundos]	TT-302'	TT-302 (MRI)	DC
0	0	0	0
33	0.1	0	0.01
60	0.1	0	0.01
90	0.3	5.7483E-14	0.09
233	1.5	1.37686243	0.01516286
370	2	2.0762248	0.00581022
539	2.4	2.46167143	0.00380337
678	2.6	2.56093252	0.00152627
900	2.5	2.53213395	0.00103259
1039	2.5	2.4661969	0.00114265
1197	2.4	2.38102276	0.00036014
1457	2.3	2.25261712	0.00224514
1622	2.2	2.18726474	0.00016219
1841	2.1	2.12074567	0.00043038
2006	2.1	2.08380743	0.0002622
2130	2	2.06213417	0.00386066
2285	2	2.04098651	0.00167989
		Total	0.14815533
		Escalón	0.51
		τ1	350.413705
		K1	26.4068823
		τ2	447.362785
		K2	22.5543101
		td	90

Para el Transmisor TT-303.

Tabla A4-17.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-303 ante una perturbación de 0.53 m ³ /h en el flujo de alimentación de CO ₂ .							
T [segundos]	TT-303'	TT-303 (MPO)	DC	TT-303 (MSO-CA)	DC	TT-303 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
33	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
233	-0.100	-0.363	0.069	-0.110	0.000	-0.110	0.000
370	-0.400	-0.663	0.069	-0.345	0.003	-0.345	0.003
539	-0.700	-0.978	0.077	-0.700	0.000	-0.700	0.000
678	-1.000	-1.199	0.040	-0.995	0.000	-0.995	0.000
900	-1.400	-1.490	0.008	-1.419	0.000	-1.418	0.000
1039	-1.600	-1.641	0.002	-1.641	0.002	-1.640	0.002
1197	-1.800	-1.788	0.000	-1.853	0.003	-1.851	0.003
1457	-2.100	-1.982	0.014	-2.115	0.000	-2.114	0.000
1622	-2.200	-2.081	0.014	-2.235	0.001	-2.234	0.001
1841	-2.400	-2.187	0.045	-2.353	0.002	-2.352	0.002
2006	-2.500	-2.253	0.061	-2.417	0.007	-2.416	0.007
2130	-2.600	-2.296	0.093	-2.454	0.021	-2.453	0.021
2285	-2.600	-2.341	0.067	-2.491	0.012	-2.490	0.012
		Total	0.559	Total	0.052	Total	0.052
		Escalón	0.514	Escalón	0.514	Escalón	0.514
		B	-2.600	B	-2.600	B	-2.600
		Kp	-5.056	Kp	-5.056	Kp	-5.056
		τp	951.201	τp	442.953	τp	442.953
		td	90.000	td	90.000	td	90.000
				ζ	1.000	ζ	1.001

Para el Transmisor TT-304.

Tabla A4-18.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-304 ante una perturbación de 0.53 m ³ /h en el flujo de alimentación de CO ₂ .							
T [segundos]	TT-304'	TT-304 (MPO)	DC	TT-304 (MSO-CA)	DC	TT-304 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
33	-0.100	0.000	0.010	0.000	0.010	0.000	0.010
60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
90	0.100	0.000	0.010	0.000	0.010	0.000	0.010
233	-0.400	-0.618	0.048	-0.173	0.051	-0.173	0.051
370	-0.800	-1.135	0.112	-0.553	0.061	-0.554	0.061
539	-1.300	-1.686	0.149	-1.144	0.024	-1.145	0.024
678	-1.700	-2.077	0.142	-1.649	0.003	-1.650	0.002
900	-2.300	-2.601	0.091	-2.398	0.010	-2.399	0.010
1039	-2.500	-2.877	0.142	-2.805	0.093	-2.805	0.093
1197	-3.000	-3.149	0.022	-3.203	0.041	-3.203	0.041
1457	-3.600	-3.515	0.007	-3.715	0.013	-3.715	0.013
1622	-3.900	-3.704	0.039	-3.960	0.004	-3.960	0.004
1841	-4.400	-3.912	0.238	-4.208	0.037	-4.208	0.037
2006	-4.700	-4.043	0.432	-4.349	0.123	-4.348	0.124
2130	-4.800	-4.128	0.452	-4.433	0.135	-4.432	0.135
2285	-4.800	-4.221	0.335	-4.517	0.080	-4.516	0.080
		Total	2.228	Total	0.695	Total	0.696
		Escalón	0.514	Escalón	0.514	Escalón	0.514
		B	-4.800	B	-4.800	B	-4.800
		Kp	-9.335	Kp	-9.335	Kp	-9.335
		τp	1037.545	τp	483.006	τp	482.622
		td	90.000	td	90.000	td	90.000
				ζ	1.000	ζ	1.001

Para el Transmisor TT-305.

Tabla A4-19.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-305 ante una perturbación de 0.53 m ³ /h en el flujo de alimentación de CO ₂ .							
T [segundos]	TT-305'	TT-305 (MPO)	DC	TT-305 (MSO-CA)	DC	TI-305 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
33	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
233	-0.600	-0.879	0.078	-0.304	0.087	-0.397	0.041
370	-1.200	-1.585	0.148	-0.924	0.076	-1.106	0.009
539	-2.000	-2.302	0.091	-1.802	0.039	-1.995	0.000
678	-2.600	-2.786	0.035	-2.485	0.013	-2.630	0.001
900	-3.300	-3.403	0.011	-3.391	0.008	-3.425	0.016
1039	-3.700	-3.710	0.000	-3.832	0.017	-3.804	0.011
1197	-4.100	-3.999	0.010	-4.225	0.016	-4.143	0.002
1457	-4.500	-4.364	0.018	-4.672	0.030	-4.544	0.002
1622	-4.700	-4.541	0.025	-4.859	0.025	-4.723	0.001
1841	-5.000	-4.725	0.076	-5.027	0.001	-4.897	0.011
2006	-5.200	-4.834	0.134	-5.111	0.008	-4.992	0.043
2130	-5.300	-4.902	0.159	-5.157	0.020	-5.049	0.063
2285	-5.300	-4.973	0.107	-5.200	0.010	-5.105	0.038
		Total	0.892	Total	0.352	Total	0.237
		Escalón	0.514	Escalón	0.514	Escalón	0.514
		B	-5.300	B	-5.300	B	-5.300
		Kp	-10.307	Kp	-10.307	Kp	-10.307
		τp	788.249	τp	371.992	τp	307.593
		td	90.000	td	90.000	td	90.000
				ζ	1.000	ζ	1.244

Para el Transmisor TT-306.

Tabla A4-20.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-306 ante una perturbación de 0.53 m ³ /h en el flujo de alimentación de CO ₂ .							
T [segundos]	TT-306'	TT-306 (MPO)	DC	TT-306 (MSO-CA)	DC	TI-306 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
33	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
233	-0.600	-0.642	0.002	-0.274	0.106	-0.480	0.014
370	-1.000	-1.127	0.016	-0.778	0.049	-1.032	0.001
539	-1.500	-1.591	0.008	-1.408	0.008	-1.559	0.003
678	-1.800	-1.885	0.007	-1.839	0.002	-1.886	0.007
900	-2.200	-2.232	0.001	-2.334	0.018	-2.261	0.004
1039	-2.400	-2.393	0.000	-2.540	0.020	-2.428	0.001
1197	-2.600	-2.534	0.004	-2.703	0.011	-2.573	0.001
1457	-2.800	-2.699	0.010	-2.859	0.003	-2.736	0.004
1622	-2.900	-2.772	0.016	-2.913	0.000	-2.805	0.009
1841	-3.000	-2.842	0.025	-2.955	0.002	-2.870	0.017
2006	-3.000	-2.881	0.014	-2.973	0.001	-2.904	0.009
2130	-3.000	-2.903	0.009	-2.981	0.000	-2.924	0.006
2285	-3.000	-2.925	0.006	-2.989	0.000	-2.943	0.003
		Total	0.119	Total	0.220	Total	0.079
		Escalón	0.514	Escalón	0.514	Escalón	0.514
		B	-3.000	B	-3.000	B	-3.000
		Kp	-5.834	Kp	-5.834	Kp	-5.834
		τp	594.223	τp	283.795	τp	164.202
		td	90.000	td	90.000	td	90.000
				ζ	1.000	ζ	1.799

Perturbación de 0.99 m³/h.

Para el Transmisor TT-302

Tabla A4-21.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-302 ante una perturbación de 0.99 m ³ /h en el flujo de alimentación de CO ₂ .			
T [segundos]	TT-302'	TT-302 (MRI)	DC
0	0.000	0.000	0.000
19	0.400	0.165	0.055
45	1.300	1.055	0.060
109	2.200	2.291	0.008
165	2.600	2.745	0.021
237	2.900	2.937	0.001
305	3.000	2.944	0.003
380	2.900	2.881	0.000
444	2.900	2.812	0.008
501	2.900	2.750	0.023
572	2.700	2.679	0.000
628	2.700	2.630	0.005
696	2.500	2.579	0.006
753	2.400	2.542	0.020
786	2.400	2.523	0.015
2230	2.400	2.324	0.006
		Total	0.232
		Escalón	0.985
		τ1	84.872
		K1	4.041
		τ2	367.585
		K2	1.687
		td	15.000

Para el Transmisor TT-303.

Tabla A4-22.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-303 ante una perturbación de 0.99 m ³ /h en el flujo de alimentación de CO ₂ .							
T [segundos]	TT-303'	TT-303 (MPO)	DC	TT-303 (MSO-CA)	DC	TT-303 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19	0.000	-0.043	0.002	-0.001	0.000	-0.001	0.000
45	0.200	-0.310	0.260	-0.056	0.065	-0.056	0.065
109	-0.100	-0.888	0.621	-0.424	0.105	-0.424	0.105
165	-0.700	-1.312	0.375	-0.871	0.029	-0.871	0.029
237	-1.400	-1.765	0.133	-1.464	0.004	-1.464	0.004
305	-1.900	-2.114	0.046	-1.967	0.004	-1.967	0.004
380	-2.300	-2.426	0.016	-2.426	0.016	-2.426	0.016
444	-2.700	-2.643	0.003	-2.736	0.001	-2.736	0.001
501	-3.000	-2.805	0.038	-2.955	0.002	-2.955	0.002
572	-3.300	-2.973	0.107	-3.166	0.018	-3.166	0.018
628	-3.500	-3.082	0.174	-3.292	0.043	-3.292	0.043
696	-3.600	-3.194	0.165	-3.408	0.037	-3.408	0.037
753	-3.700	-3.271	0.184	-3.480	0.048	-3.480	0.048
786	-3.700	-3.311	0.152	-3.514	0.035	-3.514	0.035
2230	-3.700	-3.694	0.000	-3.700	0.000	-3.700	0.000
		Total	2.277	Total	0.408	Total	0.408
		Escalón	0.985	Escalón	0.985	Escalón	0.985
		B	-3.700	B	-3.700	B	-3.700
		Kp	-3.755	Kp	-3.755	Kp	-3.755
		τp	342.402	τp	162.789	τp	162.787
		td	15.000	td	15.000	td	15.000
				ζ	1.000	ζ	1.000

Para el Transmisor TT-304.

Tabla A4-23.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-304 ante una perturbación de 0.99 m ³ /h en el flujo de alimentación de CO ₂ .							
T [segundos]	TT-304'	TT-304 (MPO)	DC	TT-304 (MSO-CA)	DC	TT-304 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19	0.000	-0.055	0.003	-0.002	0.000	-0.002	0.000
45	-0.100	-0.399	0.089	-0.076	0.001	-0.099	0.000
109	-0.900	-1.134	0.055	-0.566	0.112	-0.678	0.049
165	-1.400	-1.665	0.070	-1.146	0.064	-1.294	0.011
237	-2.000	-2.223	0.050	-1.893	0.011	-2.021	0.000
305	-2.500	-2.645	0.021	-2.508	0.000	-2.582	0.007
380	-2.800	-3.016	0.047	-3.051	0.063	-3.061	0.068
444	-3.300	-3.270	0.001	-3.406	0.011	-3.372	0.005
501	-3.600	-3.457	0.020	-3.651	0.003	-3.589	0.000
572	-3.700	-3.647	0.003	-3.879	0.032	-3.797	0.009
628	-4.000	-3.770	0.053	-4.011	0.000	-3.923	0.006
696	-4.100	-3.892	0.043	-4.130	0.001	-4.041	0.003
753	-4.400	-3.976	0.180	-4.202	0.039	-4.117	0.080
786	-4.400	-4.018	0.146	-4.235	0.027	-4.154	0.061
2230	-4.400	-4.396	0.000	-4.400	0.000	-4.399	0.000
		Total	0.781	Total	0.364	Total	0.301
		Escalón	0.985	Escalón	0.985	Escalón	0.985
		B	-4.400	B	-4.400	B	-4.400
		Kp	-4.466	Kp	-4.466	Kp	-4.466
		τp	315.486	τp	151.553	τp	129.133
		td	15.000	td	15.000	td	15.000
				ζ	1.000	ζ	1.195

Para el Transmisor TT-305.

Tabla A4-24.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-305 ante una perturbación de 0.99 m ³ /h en el flujo de alimentación de CO ₂ .							
T [segundos]	TT-305'	TT-305 (MPO)	DC	TT-305 (MSO-CA)	DC	TT-305 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19	-0.100	-0.069	0.001	-0.002	0.010	-0.002	0.010
45	-0.300	-0.493	0.037	-0.100	0.040	-0.119	0.033
109	-1.100	-1.389	0.083	-0.729	0.138	-0.822	0.077
165	-1.700	-2.025	0.106	-1.451	0.062	-1.571	0.017
237	-2.400	-2.681	0.079	-2.351	0.002	-2.448	0.002
305	-2.900	-3.168	0.072	-3.063	0.027	-3.113	0.045
380	-3.500	-3.587	0.008	-3.669	0.028	-3.665	0.027
444	-3.900	-3.868	0.001	-4.050	0.023	-4.012	0.013
501	-4.200	-4.070	0.017	-4.304	0.011	-4.247	0.002
572	-4.500	-4.273	0.052	-4.533	0.001	-4.464	0.001
628	-4.700	-4.401	0.089	-4.662	0.001	-4.590	0.012
696	-4.900	-4.527	0.139	-4.773	0.016	-4.705	0.038
753	-5.000	-4.611	0.151	-4.839	0.026	-4.776	0.050
786	-5.000	-4.653	0.120	-4.868	0.018	-4.809	0.037
2230	-5.000	-4.998	0.000	-5.000	0.000	-5.000	0.000
		Total	0.955	Total	0.402	Total	0.364
		Escalón	0.985	Escalón	0.985	Escalón	0.985
		B	-5.000	B	-5.000	B	-5.000
		Kp	-5.075	Kp	-5.075	Kp	-5.075
		τp	288.878	τp	140.077	τp	125.754
		td	15.000	td	15.000	td	15.000
				ζ	1.000	ζ	1.127

Para el Transmisor TT-306.

Tabla A4-25.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-306 ante una perturbación de 0.99 m ³ /h en el flujo de alimentación de CO ₂ .							
T [segundos]	TT-306'	TT-306 (MPO)	DC	TT-306 (MSO-CA)	DC	TT-306 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19	-0.100	-0.053	0.002	-0.002	0.010	-0.003	0.009
45	-0.300	-0.374	0.006	-0.086	0.046	-0.132	0.028
109	-0.900	-1.037	0.019	-0.600	0.090	-0.770	0.017
165	-1.300	-1.492	0.037	-1.155	0.021	-1.328	0.001
237	-1.800	-1.946	0.021	-1.800	0.000	-1.897	0.009
305	-2.200	-2.269	0.005	-2.274	0.005	-2.288	0.008
380	-2.500	-2.537	0.001	-2.646	0.021	-2.596	0.009
444	-2.700	-2.710	0.000	-2.863	0.027	-2.783	0.007
501	-2.900	-2.831	0.005	-2.998	0.010	-2.908	0.000
572	-3.100	-2.947	0.023	-3.112	0.000	-3.022	0.006
628	-3.300	-3.018	0.079	-3.172	0.016	-3.088	0.045
696	-3.300	-3.085	0.046	-3.220	0.006	-3.147	0.023
753	-3.300	-3.129	0.029	-3.246	0.003	-3.184	0.013
786	-3.300	-3.150	0.022	-3.258	0.002	-3.201	0.010
2230	-3.300	-3.300	0.000	-3.300	0.000	-3.300	0.000
		Total	0.296	Total	0.257	Total	0.186
		Escalón	0.985	Escalón	0.985	Escalón	0.985
		B	-3.300	B	-3.300	B	-3.300
		Kp	-3.349	Kp	-3.349	Kp	-3.349
		τp	249.191	τp	121.418	τp	92.100
		td	15.000	td	15.000	td	15.000
				ζ	1.000	ζ	1.345

Perturbación de 0.72 m³/h.

Para el Transmisor TT-302.

Tabla A4-26.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-302 ante una perturbación de 0.72 m ³ /h en el flujo de alimentación de CO ₂ .			
T [segundos]	TT-302'	TT-302 (MRI)	DC
0	0.000	0.000	0.000
85	2.000	1.143	0.735
164	2.400	2.632	0.054
270	2.800	2.830	0.001
394	2.700	2.625	0.006
563	2.500	2.400	0.010
755	2.200	2.277	0.006
898	2.200	2.234	0.001
1097	2.200	2.206	0.000
1274	2.200	2.196	0.000
1440	2.200	2.191	0.000
		Total	0.813
		Escalón	0.715
		τ1	65.219
		K1	6.013
		τ2	220.076
		K2	2.956
		td	60.000

Para el Transmisor TT-303.

Tabla A4-27.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-303 ante una perturbación de 0.72 m ³ /h en el flujo de alimentación de CO ₂ .							
T [segundos]	TT-303'	TT-303 (MPO)	DC	TT-303 (MSO-CA)	DC	TT-303 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
85	-0.100	-0.201	0.010	-0.019	0.007	-0.025	0.006
164	-0.500	-0.781	0.079	-0.273	0.052	-0.333	0.028
270	-1.100	-1.447	0.120	-0.869	0.054	-0.994	0.011
394	-1.800	-2.087	0.082	-1.666	0.018	-1.799	0.000
563	-2.600	-2.767	0.028	-2.646	0.002	-2.714	0.013
755	-3.400	-3.335	0.004	-3.472	0.005	-3.451	0.003
898	-3.700	-3.653	0.002	-3.899	0.039	-3.831	0.017
1097	-4.200	-3.983	0.047	-4.288	0.008	-4.190	0.000
1274	-4.500	-4.196	0.092	-4.497	0.000	-4.397	0.011
1440	-4.800	-4.345	0.207	-4.617	0.034	-4.527	0.075
		Total	0.672	Total	0.218	Total	0.163
		Escalón	0.715	Escalón	0.715	Escalón	0.715
		B	-4.800	B	-4.800	B	-4.800
		Kp	-6.709	Kp	-6.709	Kp	-6.709
		τp	585.574	τp	272.233	τp	236.417
		td	60.000	td	60.000	td	60.000
				ζ	1.000	ζ	1.180

Para el Transmisor TT-304.

Tabla A4-28.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-304 ante una perturbación de 0.72 m ³ /h en el flujo de alimentación de CO ₂ .							
T [segundos]	TT-304'	TT-304 (MPO)	DC	TT-304 (MSO-CA)	DC	TI-304 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
85	0.000	-0.126	0.016	-0.011	0.000	-0.012	0.000
164	-0.300	-0.494	0.038	-0.156	0.021	-0.168	0.017
270	-0.700	-0.923	0.050	-0.510	0.036	-0.545	0.024
394	-1.000	-1.346	0.120	-1.007	0.000	-1.065	0.004
563	-1.600	-1.808	0.043	-1.656	0.003	-1.730	0.017
755	-2.100	-2.209	0.012	-2.245	0.021	-2.320	0.048
898	-2.500	-2.440	0.004	-2.572	0.005	-2.639	0.019
1097	-2.900	-2.689	0.045	-2.891	0.000	-2.944	0.002
1274	-3.200	-2.856	0.119	-3.076	0.015	-3.116	0.007
1440	-3.400	-2.976	0.180	-3.191	0.044	-3.221	0.032
		Total	0.625	Total	0.145	Total	0.172
		Escalón	0.715	Escalón	0.715	Escalón	0.715
		B	-3.400	B	-3.400	B	-3.400
		Kp	-4.753	Kp	-4.753	Kp	-4.753
		τp	662.698	τp	307.215	τp	294.498
		td	60.000	td	60.000	td	60.000
				ζ	1.000	ζ	1.001

Para el Transmisor TT-305.

Tabla A4-29.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-305 ante una perturbación de 0.72 m ³ /h en el flujo de alimentación de CO ₂ .							
T [segundos]	TT-305'	TT-305 (MPO)	DC	TT-305 (MSO-CA)	DC	TT-305 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
85	-0.100	-0.214	0.013	-0.021	0.006	-0.032	0.005
164	-0.700	-0.832	0.018	-0.293	0.166	-0.409	0.085
270	-1.300	-1.538	0.057	-0.929	0.138	-1.152	0.022
394	-1.900	-2.214	0.099	-1.774	0.016	-1.994	0.009
563	-2.700	-2.928	0.052	-2.803	0.011	-2.903	0.041
755	-3.500	-3.519	0.000	-3.661	0.026	-3.619	0.014
898	-3.900	-3.847	0.003	-4.099	0.040	-3.990	0.008
1097	-4.400	-4.186	0.046	-4.495	0.009	-4.346	0.003
1274	-4.800	-4.403	0.157	-4.704	0.009	-4.556	0.059
1440	-5.000	-4.554	0.199	-4.823	0.031	-4.692	0.095
		Total	0.643	Total	0.451	Total	0.341
		Escalón	0.715	Escalón	0.715	Escalón	0.715
		B	-5.000	B	-5.000	B	-5.000
		Kp	-6.989	Kp	-6.989	Kp	-6.989
		τp	571.127	τp	267.517	τp	209.376
		td	60.000	td	60.000	td	60.000
				ζ	1.000	ζ	1.320

Para el Transmisor TT-306.

Tabla A4-30.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-306 ante una perturbación de 0.72 m ³ /h en el flujo de alimentación de CO ₂ .							
T [segundos]	TT-306'	TT-306 (MPO)	DC	TT-306 (MSO-CA)	DC	TT-306 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
85	0.000	-0.140	0.020	-0.016	0.000	-0.035	0.001
164	-0.400	-0.539	0.019	-0.221	0.032	-0.364	0.001
270	-0.900	-0.982	0.007	-0.671	0.052	-0.871	0.001
394	-1.300	-1.391	0.008	-1.223	0.006	-1.354	0.003
563	-1.800	-1.804	0.000	-1.831	0.001	-1.827	0.001
755	-2.200	-2.129	0.005	-2.278	0.006	-2.180	0.000
898	-2.300	-2.300	0.000	-2.481	0.033	-2.357	0.003
1097	-2.500	-2.468	0.001	-2.643	0.021	-2.522	0.000
1274	-2.700	-2.569	0.017	-2.719	0.000	-2.616	0.007
1440	-2.800	-2.636	0.027	-2.757	0.002	-2.676	0.015
		Total	0.104	Total	0.153	Total	0.034
		Escalón	0.715	Escalón	0.715	Escalón	0.715
		B	-2.800	B	-2.800	B	-2.800
		Kp	-3.914	Kp	-3.914	Kp	-3.914
		τp	486.473	τp	225.015	τp	144.833
		td	60.000	td	60.000	td	60.000
				ζ	1.000	ζ	1.642

Perturbaciones en el flujo de alimentación de aire.

Perturbación de 0.94 m³/h.

Para el transmisor TT-302.

Tabla A4-31.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-302 ante una perturbación de 0.94 m ³ /h en el flujo de alimentación de aire.			
T [segundos]	TT-302'	TT-302 (MRI)	DC
0	0.000	0.000	0.000
15	0.200	0.051	0.022
68	0.700	0.499	0.041
196	0.900	1.024	0.015
282	1.000	1.076	0.006
376	0.900	0.962	0.004
677	0.100	0.087	0.000
989	-0.400	-0.880	0.230
1238	-1.500	-1.469	0.001
1490	-2.000	-1.892	0.012
1659	-2.200	-2.095	0.011
1761	-2.400	-2.192	0.043
1851	-2.500	-2.265	0.055
2040	-2.500	-2.385	0.013
		Total	0.517
		Escalón	0.937
		τ1	363.292
		K1	28.237
		τ2	466.318
		K2	31.076
		td	10.000

Para el Transmisor TT-303.

Tabla A4-32.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-303 ante una perturbación de 0.94 m ³ /h en el flujo de alimentación de aire.							
T [segundos]	TT-303'	TT-303 (MPO)	DC	TT-303 (MSO-CA)	DC	TT-303 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	0.000	-0.038	0.001	-0.001	0.000	-0.001	0.000
68	0.000	-0.424	0.180	-0.071	0.005	-0.144	0.021
196	-1.100	-1.249	0.022	-0.574	0.276	-0.898	0.041
282	-1.600	-1.726	0.016	-1.049	0.304	-1.448	0.023
376	-1.900	-2.186	0.082	-1.604	0.088	-1.998	0.010
677	-3.000	-3.316	0.100	-3.204	0.041	-3.328	0.108
989	-4.100	-4.082	0.000	-4.296	0.039	-4.179	0.006
1238	-4.400	-4.495	0.009	-4.811	0.169	-4.612	0.045
1490	-4.900	-4.791	0.012	-5.118	0.048	-4.906	0.000
1659	-5.200	-4.939	0.068	-5.246	0.002	-5.046	0.024
1761	-5.400	-5.013	0.150	-5.302	0.010	-5.114	0.082
1851	-5.500	-5.070	0.185	-5.342	0.025	-5.166	0.112
2040	-5.500	-5.169	0.110	-5.401	0.010	-5.253	0.061
		Total	0.942	Total	1.017	Total	0.534
		Escalón	0.937	Escalón	0.937	Escalón	0.937
		B	-5.500	B	-5.500	B	-5.500
		Kp	-5.869	Kp	-5.869	Kp	-5.869
		τ_p	722.349	τ_p	340.676	τ_p	222.448
		td	10.000	td	10.000	td	10.000
				ζ	1.000	ζ	1.587

Para el Transmisor TT-304.

Tabla A4-33.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-304 ante una perturbación de 0.94 m ³ /h en el flujo de alimentación de aire.							
T [segundos]	TT-304'	TT-304 (MPO)	DC	TT-304 (MSO-CA)	DC	TT-304 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	-0.100	-0.028	0.005	0.000	0.010	-0.028	0.005
68	-0.500	-0.310	0.036	-0.056	0.197	-0.310	0.036
196	-0.800	-0.907	0.011	-0.443	0.127	-0.907	0.011
282	-1.300	-1.247	0.003	-0.799	0.251	-1.247	0.003
376	-1.400	-1.572	0.030	-1.206	0.038	-1.572	0.030
677	-2.200	-2.350	0.022	-2.323	0.015	-2.350	0.022
989	-2.500	-2.857	0.128	-3.029	0.280	-2.857	0.128
1238	-3.200	-3.122	0.006	-3.339	0.019	-3.122	0.006
1490	-3.300	-3.305	0.000	-3.512	0.045	-3.305	0.000
1659	-3.900	-3.394	0.256	-3.580	0.102	-3.394	0.256
1761	-3.600	-3.438	0.026	-3.609	0.000	-3.438	0.026
1851	-3.700	-3.471	0.052	-3.629	0.005	-3.471	0.052
2040	-3.700	-3.528	0.030	-3.658	0.002	-3.528	0.030
		Total	0.607	Total	1.092	Total	0.607
		Escalón	0.937	Escalón	0.937	Escalón	0.937
		B	-3.700	B	-3.700	B	-3.700
		Kp	-3.948	Kp	-3.948	Kp	-3.948
		τp	661.744	τp	313.296	τp	2.466
		td	10.000	td	10.000	td	10.000
				ζ	1.000	ζ	134.186

Para el Transmisor TT-305.

Tabla A4-34.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-305 ante una perturbación de 0.94 m ³ /h en el flujo de alimentación de aire.							
T [segundos]	TT-305'	TT-305 (MPO)	DC	TT-305 (MSO-CA)	DC	TT-305 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	0.000	-0.045	0.002	-0.001	0.000	-0.045	0.002
68	-0.500	-0.500	0.000	-0.120	0.144	-0.500	0.000
196	-1.500	-1.433	0.005	-0.885	0.378	-1.433	0.005
282	-1.900	-1.948	0.002	-1.527	0.139	-1.948	0.002
376	-2.400	-2.427	0.001	-2.204	0.038	-2.427	0.001
677	-3.300	-3.510	0.044	-3.781	0.231	-3.510	0.044
989	-4.100	-4.154	0.003	-4.543	0.196	-4.154	0.003
1238	-4.500	-4.462	0.001	-4.801	0.091	-4.462	0.001
1490	-4.700	-4.659	0.002	-4.917	0.047	-4.659	0.002
1659	-4.900	-4.749	0.023	-4.954	0.003	-4.749	0.023
1761	-5.000	-4.792	0.043	-4.968	0.001	-4.792	0.043
1851	-5.000	-4.823	0.031	-4.977	0.001	-4.823	0.031
2040	-5.000	-4.874	0.016	-4.988	0.000	-4.874	0.016
		Total	0.173	Total	1.269	Total	0.173
		Escalón	0.937	Escalón	0.937	Escalón	0.937
		B	-5.000	B	-5.000	B	-5.000
		Kp	-5.335	Kp	-5.335	Kp	-5.335
		τ_p	550.950	τ_p	244.639	τ_p	2.253
		td	10.000	td	10.000	td	10.000
				ζ	1.000	ζ	122.285

Para el Transmisor TT-306.

Tabla A4-35.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-306 ante una perturbación de 0.94 m ³ /h en el flujo de alimentación de aire.							
T [segundos]	TT-306'	TT-306 (MPO)	DC	TT-306 (MSO-CA)	DC	TT-306 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	0.000	-0.047	0.002	-0.002	0.000	-0.047	0.002
68	-0.600	-0.495	0.011	-0.204	0.157	-0.495	0.011
196	-1.300	-1.291	0.000	-1.143	0.025	-1.291	0.000
282	-1.700	-1.656	0.002	-1.683	0.000	-1.656	0.002
376	-1.900	-1.949	0.002	-2.095	0.038	-1.949	0.002
677	-2.300	-2.438	0.019	-2.606	0.094	-2.438	0.019
989	-2.700	-2.612	0.008	-2.688	0.000	-2.612	0.008
1238	-2.700	-2.663	0.001	-2.698	0.000	-2.663	0.001
1490	-2.700	-2.685	0.000	-2.700	0.000	-2.685	0.000
1659	-2.700	-2.692	0.000	-2.700	0.000	-2.692	0.000
1761	-2.700	-2.694	0.000	-2.700	0.000	-2.694	0.000
1851	-2.700	-2.696	0.000	-2.700	0.000	-2.696	0.000
2040	-2.700	-2.698	0.000	-2.700	0.000	-2.698	0.000
		Total	0.046	Total	0.314	Total	0.046
		Escalón	0.937	Escalón	0.937	Escalón	0.937
		B	-2.700	B	-2.700	B	-2.700
		Kp	-2.881	Kp	-2.881	Kp	-2.881
		τ_p	286.131	τ_p	128.812	τ_p	1.552
		td	10.000	td	10.000	td	10.000
				ζ	1.000	ζ	92.159

Perturbación de 0.47 m³/h.

Para el transmisor TT-302.

Tabla A4-36.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-302 ante una perturbación de 0.47 m ³ /h en el flujo de alimentación de aire.							
T [segundos]	TT-302'	TT-302 (MPO)	DC	TT-302 (MSO-CA)	DC	TT-302 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
45	0.300	0.223	0.006	0.053	0.061	0.221	0.006
103	0.600	0.646	0.002	0.399	0.041	0.645	0.002
208	1.000	1.158	0.025	1.091	0.008	1.158	0.025
310	1.400	1.455	0.003	1.514	0.013	1.455	0.003
441	1.800	1.669	0.017	1.765	0.001	1.669	0.017
565	2.000	1.776	0.050	1.853	0.022	1.776	0.050
787	1.900	1.859	0.002	1.894	0.000	1.859	0.002
1032	2.000	1.888	0.013	1.899	0.010	1.888	0.013
1167	1.900	1.894	0.000	1.900	0.000	1.894	0.000
1261	1.900	1.896	0.000	1.900	0.000	1.896	0.000
1318	1.900	1.897	0.000	1.900	0.000	1.897	0.000
1380	1.900	1.898	0.000	1.900	0.000	1.898	0.000
2000	1.900	1.900	0.000	1.900	0.000	1.900	0.000
		Total	0.118	Total	0.156	Total	0.118
		Escalón	0.467	Escalón	0.467	Escalón	0.467
		B	1.900	B	1.900	B	1.900
		Kp	4.072	Kp	4.072	Kp	4.072
		τp	199.865	τp	97.476	τp	8.621
		td	20.000	td	20.000	td	20.000
				ζ	1.000	ζ	11.587

Para el Transmisor TT-303.

Tabla A4-37.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-303 ante una perturbación de 0.47 m ³ /h en el flujo de alimentación de aire.							
T [segundos]	TT-303'	TT-303 (MPO)	DC	TT-303 (MSO-CA)	DC	TT-303 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
45	0.000	-0.062	0.004	-0.006	0.000	-0.007	0.000
103	-0.100	-0.195	0.009	-0.057	0.002	-0.064	0.001
208	-0.400	-0.402	0.000	-0.226	0.030	-0.245	0.024
310	-0.400	-0.570	0.029	-0.423	0.001	-0.447	0.002
441	-0.700	-0.745	0.002	-0.666	0.001	-0.684	0.000
565	-0.800	-0.876	0.006	-0.859	0.004	-0.868	0.005
787	-1.000	-1.049	0.002	-1.104	0.011	-1.096	0.009
1032	-1.300	-1.174	0.016	-1.256	0.002	-1.240	0.004
1167	-1.300	-1.223	0.006	-1.305	0.000	-1.288	0.000
1261	-1.300	-1.251	0.002	-1.329	0.001	-1.313	0.000
1318	-1.400	-1.265	0.018	-1.341	0.004	-1.325	0.006
1380	-1.400	-1.279	0.015	-1.351	0.002	-1.337	0.004
2000	-1.400	-1.361	0.002	-1.394	0.000	-1.388	0.000
		Total	0.110	Total	0.057	Total	0.055
		Escalón	0.467	Escalón	0.467	Escalón	0.467
		B	-1.400	B	-1.400	B	-1.400
		Kp	-3.000	Kp	-3.000	Kp	-3.000
		τ_p	554.687	τ_p	262.715	τ_p	243.515
		td	20.000	td	20.000	td	20.000
				ζ	1.000	ζ	1.092

Para el Transmisor TT-304.

Tabla A4-38.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-304 ante una perturbación de 0.47 m ³ /h en el flujo de alimentación de aire.							
T [segundos]	TT-304'	TT-304 (MPO)	DC	TT-304 (MSO-CA)	DC	TT-304 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
45	-0.100	-0.078	0.000	-0.009	0.008	-0.078	0.001
103	-0.300	-0.243	0.003	-0.081	0.048	-0.243	0.003
208	-0.500	-0.495	0.000	-0.308	0.037	-0.495	0.000
310	-0.600	-0.691	0.008	-0.557	0.002	-0.691	0.008
441	-0.800	-0.888	0.008	-0.840	0.002	-0.888	0.008
565	-1.000	-1.030	0.001	-1.048	0.002	-1.030	0.001
787	-1.100	-1.207	0.012	-1.284	0.034	-1.207	0.012
1032	-1.400	-1.326	0.005	-1.410	0.000	-1.326	0.005
1167	-1.500	-1.370	0.017	-1.445	0.003	-1.370	0.017
1261	-1.500	-1.393	0.011	-1.461	0.001	-1.393	0.011
1318	-1.500	-1.406	0.009	-1.469	0.001	-1.406	0.009
1380	-1.500	-1.417	0.007	-1.475	0.001	-1.417	0.007
2000	-1.500	-1.478	0.000	-1.498	0.000	-1.478	0.000
		Total	0.082	Total	0.139	Total	0.082
		Escalón	0.467	Escalón	0.467	Escalón	0.467
		B	-1.500	B	-1.500	B	-1.500
		Kp	-3.214	Kp	-3.214	Kp	-3.214
		τ_p	469.362	τ_p	224.104	τ_p	5.997
		td	20.000	td	20.000	td	20.000
				ζ	1.000	ζ	39.131

Para el Transmisor TT-305.

Tabla A4-39.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-305 ante una perturbación de 0.47 m ³ /h en el flujo de alimentación de aire.							
T [segundos]	TT-305'	TT-305 (MPO)	DC	TT-305 (MSO-CA)	DC	TT-305 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
45	-0.100	-0.135	0.001	-0.015	0.007	-0.033	0.005
103	-0.400	-0.422	0.000	-0.136	0.070	-0.248	0.023
208	-0.800	-0.863	0.004	-0.524	0.076	-0.733	0.004
310	-1.100	-1.210	0.012	-0.956	0.021	-1.141	0.002
441	-1.400	-1.560	0.026	-1.458	0.003	-1.547	0.022
565	-1.700	-1.816	0.013	-1.833	0.018	-1.834	0.018
787	-2.000	-2.139	0.019	-2.271	0.073	-2.181	0.033
1032	-2.500	-2.360	0.019	-2.514	0.000	-2.405	0.009
1167	-2.700	-2.443	0.066	-2.584	0.013	-2.484	0.047
1261	-2.700	-2.488	0.045	-2.618	0.007	-2.526	0.030
1318	-2.700	-2.511	0.036	-2.633	0.004	-2.548	0.023
1380	-2.700	-2.534	0.028	-2.647	0.003	-2.568	0.017
2000	-2.700	-2.653	0.002	-2.695	0.000	-2.668	0.001
		Total	0.273	Total	0.296	Total	0.233
		Escalón	0.467	Escalón	0.467	Escalón	0.467
		B	-2.700	B	-2.700	B	-2.700
		Kp	-5.786	Kp	-5.786	Kp	-5.786
		τ_p	488.075	τ_p	232.609	τ_p	146.407
		td	20.000	td	20.000	td	20.000
				ζ	1.000	ζ	1.648

Para el Transmisor TT-306.

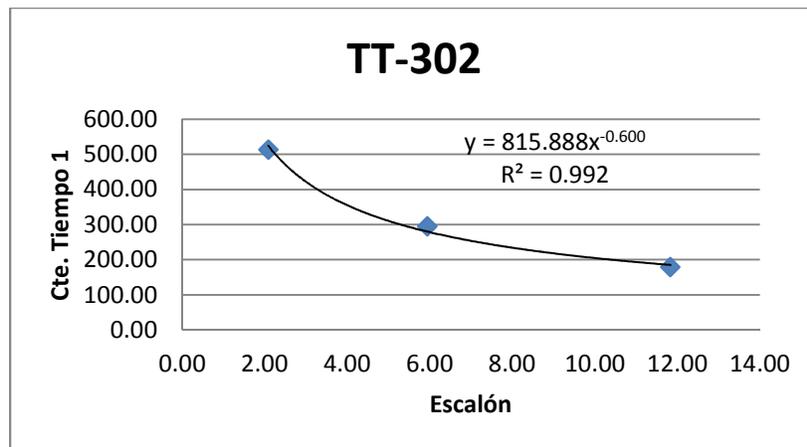
Tabla A4-40.- Respuesta y ajustes para el Transmisor TT-306 ante una perturbación de 0.47 m ³ /h en el flujo de alimentación de aire.							
T [segundos]	TI-306'	TT-306 (MPO)	DC	TT-306 (MSO-CA)	DC	TT-306 (MSO-SOB)	DC
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
45	-0.300	-0.144	0.024	-0.026	0.075	-0.144	0.024
103	-0.600	-0.436	0.027	-0.220	0.145	-0.436	0.027
208	-0.900	-0.839	0.004	-0.710	0.036	-0.839	0.004
310	-1.100	-1.116	0.000	-1.116	0.000	-1.116	0.000
441	-1.300	-1.358	0.003	-1.454	0.024	-1.359	0.003
565	-1.400	-1.508	0.012	-1.627	0.052	-1.508	0.012
787	-1.500	-1.661	0.026	-1.754	0.065	-1.661	0.026
1032	-1.800	-1.739	0.004	-1.790	0.000	-1.739	0.004
1167	-1.900	-1.761	0.019	-1.796	0.011	-1.761	0.019
1261	-1.800	-1.771	0.001	-1.798	0.000	-1.771	0.001
1318	-1.800	-1.776	0.001	-1.798	0.000	-1.776	0.001
1380	-1.800	-1.781	0.000	-1.799	0.000	-1.781	0.000
2000	-1.800	-1.798	0.000	-1.800	0.000	-1.798	0.000
		Total	0.121	Total	0.407	Total	0.121
		Escalón	0.467	Escalón	0.467	Escalón	0.467
		B	-1.800	B	-1.800	B	-1.800
		Kp	-3.857	Kp	-3.857	Kp	-3.857
		τ_p	299.612	τ_p	138.245	τ_p	0.898
		td	20.000	td	20.000	td	20.000
				ζ	1.000	ζ	166.836

Anexo 5.- Respuesta a las perturbaciones en el flujo de alimentación de solución de MEA-Agua (Programación).

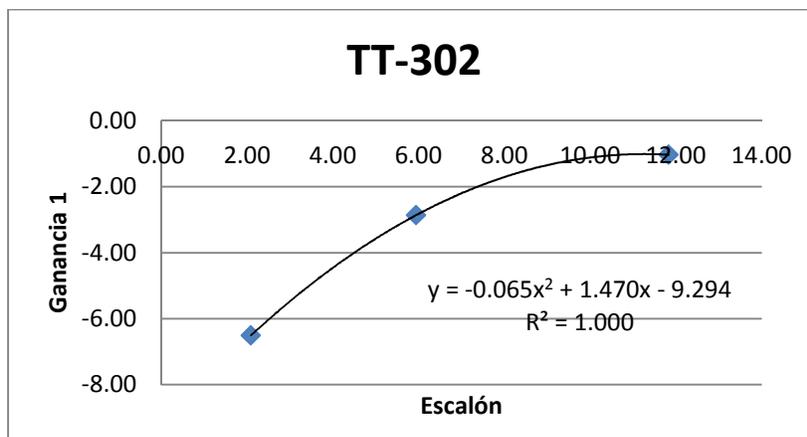
En la sección 3.1 de esta tesis, se muestra el resumen de los resultados obtenidos, no obstante, en tres casos particulares se decidió no usar el modelo que mejor describe los datos experimentales sino el que permite hacer una comparación, es decir, si por ejemplo los modelos que describían la respuesta en cierta sección de la torre eran, Segundo Orden Críticamente Amortiguado, Primer Orden y Primer Orden respectivamente para cada tamaño de escalón hecho, se usó el modelo de Primer Orden en lugar del de Segundo Orden Críticamente Amortiguado para el desarrollo del programa, esto porque sólo se puede encontrar una correlación empírica que determine los parámetros del modelo cuando el modelo es constante a pesar de la magnitud del escalón.

En las tablas siguientes se muestra para cada transmisor la relación que existe entre la magnitud del escalón aplicado (perturbación en el flujo de alimentación se la solución de MEA-Agua) y las variables que conforman el modelo dinámico que describe la respuesta a dicha perturbación. Están sombreados en un tono claro los casos en los que, como se mencionó anteriormente, se decidió usar el modelo que mejor completa el modelo general.

Tabla A5-1.- Relación entre el tamaño del escalón (perturbación) y los parámetros que conforman el modelo para el transmisor TT-302.							
Escalón [L/h]	Modelo	Tiempo muerto [segundos]	Constante tiempo 1	Ganancia 1	Constante tiempo 2	Ganancia 2	Factor de Amortiguamiento
2.09	Primer Orden	25.00	512.99	-6.51	-	-	-
5.94	Primer Orden	15.00	295.43	-2.86	-	-	-
11.83	Primer Orden	15.00	179.27	-1.03	-	-	-



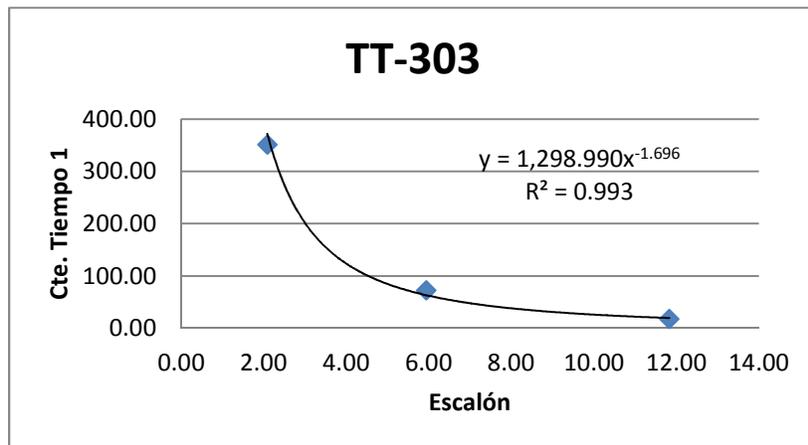
Gráfica A5-1.- Relación entre τ_1 y el tamaño del escalón para el transmisor TT-302.



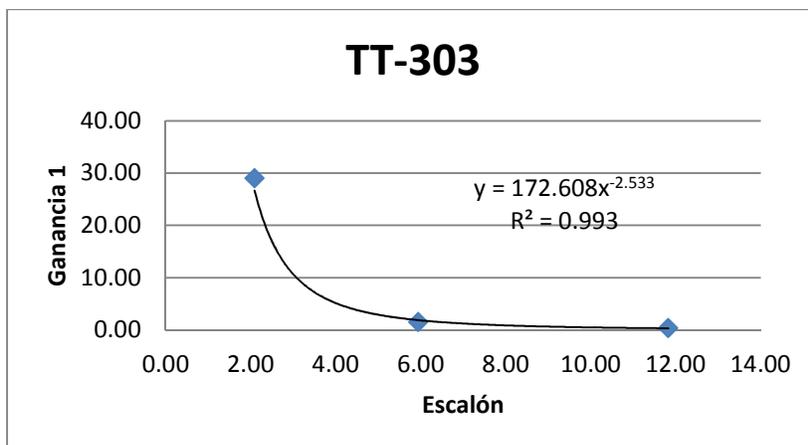
Gráfica A5-2.- Relación entre K_1 y el tamaño del escalón para el transmisor TT-302.

Tabla A5-2.- Relación entre el tamaño del escalón (perturbación) y los parámetros que conforman el modelo para el transmisor TT-303.

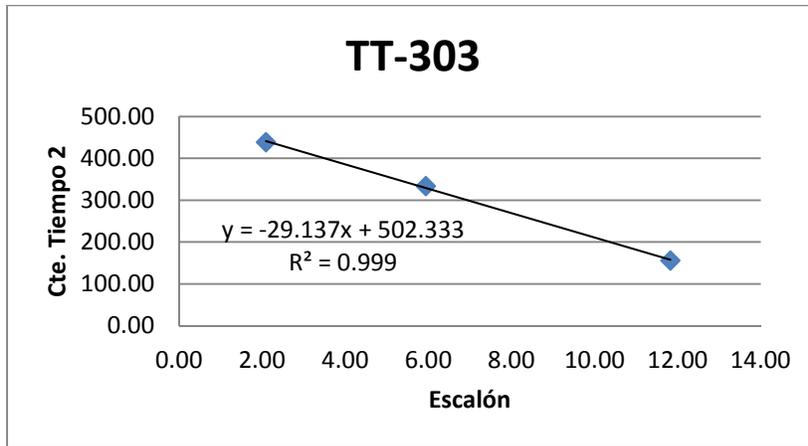
Escalón [L/h]	Modelo	Tiempo muerto [segundos]	Constante tiempo 1	Ganancia 1	Constante tiempo 2	Ganancia 2	Factor de Amortiguamiento
2.09	Respuesta Inversa	30.00	351.61	28.99	438.66	33.03	-
5.94	Respuesta Inversa	25.00	72.92	1.53	333.77	3.89	-
11.83	Respuesta Inversa	20.00	18.08	0.38	155.89	1.55	-



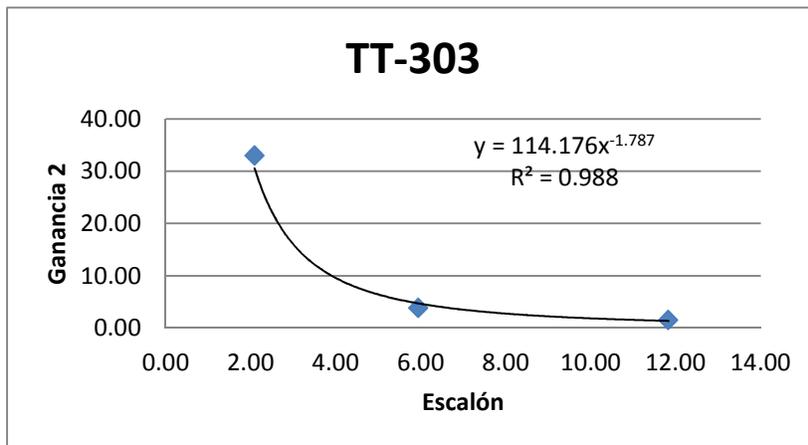
Gráfica A5-3.- Relación entre τ_1 y el tamaño del escalón para el transmisor TT-303.



Gráfica A5-4.- Relación entre K_1 y el tamaño del escalón para el transmisor TT-303.



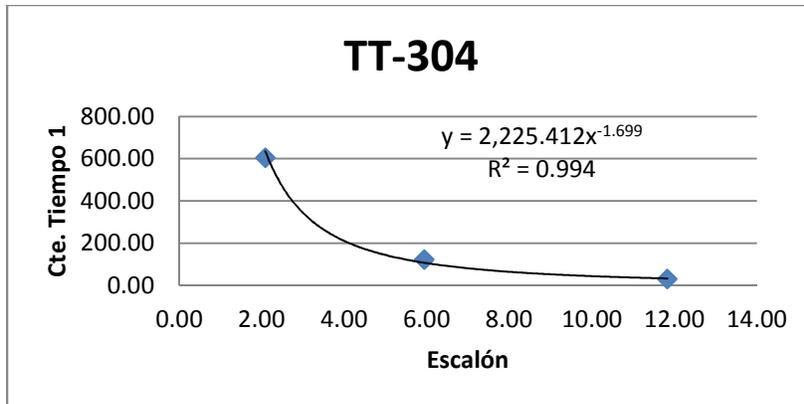
Gráfica A5-5.- Relación entre τ_2 y el tamaño del escalón para el transmisor TT-303.



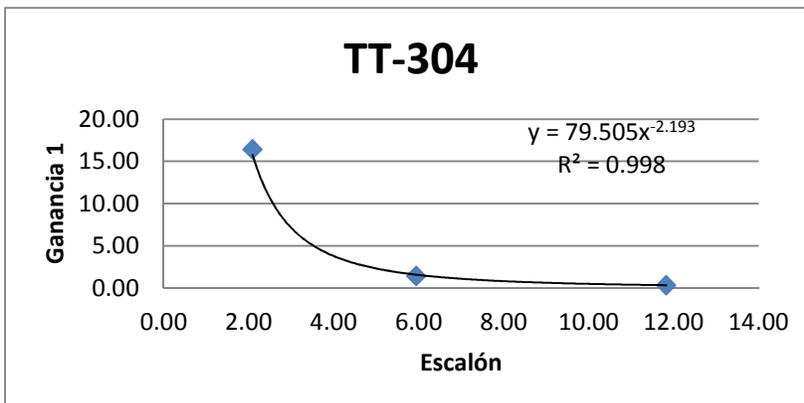
Gráfica A5-6.- Relación entre K_2 y el tamaño del escalón para el transmisor TT-303.

Tabla A5-3.- Relación entre el tamaño del escalón (perturbación) y los parámetros que conforman el modelo para el transmisor TT-304.

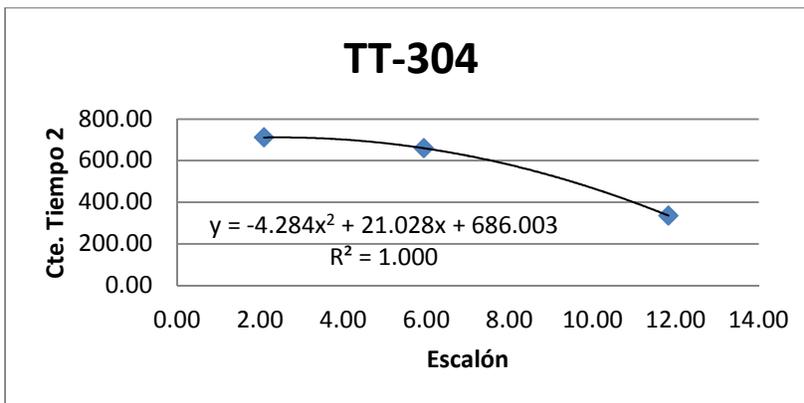
Escalón [L/h]	Modelo	Tiempo muerto [segundos]	Constante tiempo 1	Ganancia 1	Constante tiempo 2	Ganancia 2	Factor de Amortiguamiento
2.09	Respuesta Inversa	35.00	604.15	16.44	711.24	16.05	-
5.94	Respuesta Inversa	35.00	122.66	1.44	659.68	2.52	-
11.83	Respuesta Inversa	30.00	30.98	0.38	335.30	1.05	-



Gráfica A5-7.- Relación entre τ_1 y el tamaño del escalón para el transmisor TT-304.



Gráfica A5-8.- Relación entre K_1 y el tamaño del escalón para el transmisor TT-304.



Gráfica A5-9.- Relación entre τ_2 y el tamaño del escalón para el transmisor TT-304.

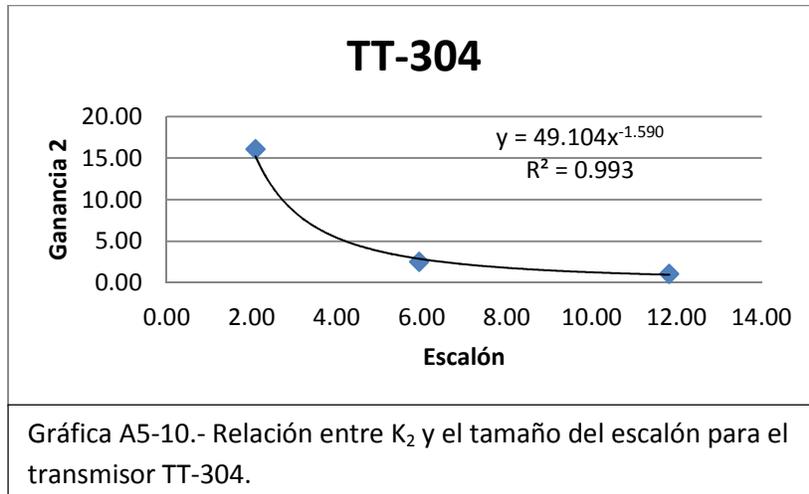
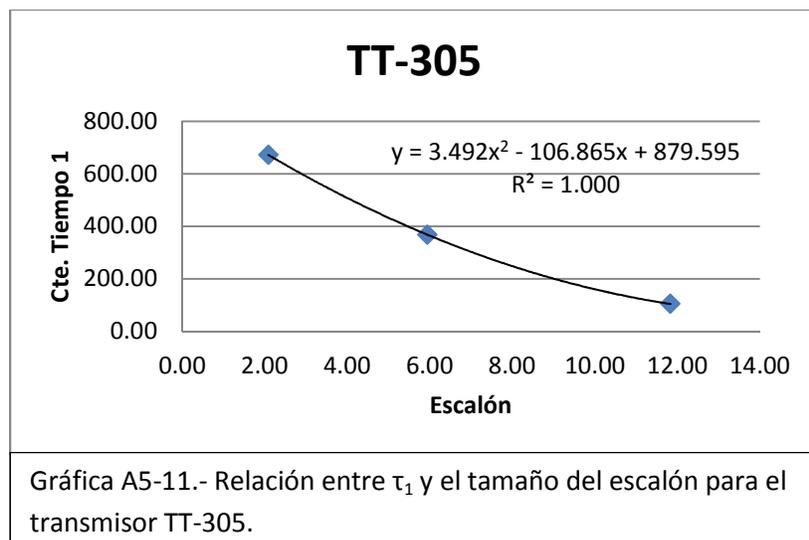
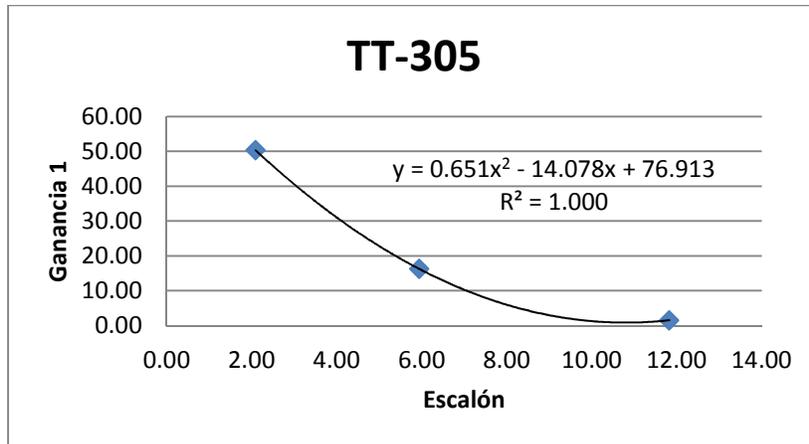


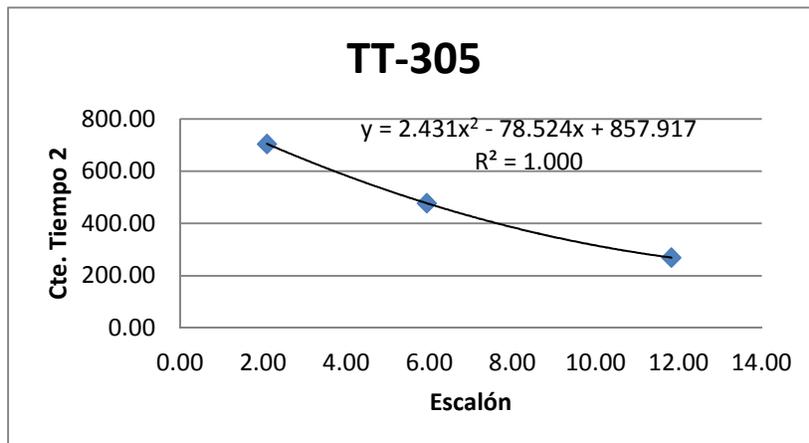
Tabla A5-4.- Relación entre el tamaño del escalón (perturbación) y los parámetros que conforman el modelo para el transmisor TT-305.

Escalón [L/h]	Modelo	Tiempo muerto [segundos]	Constante tiempo 1	Ganancia 1	Constante tiempo 2	Ganancia 2	Factor de Amortiguamiento
2.09	Respuesta Inversa	50.00	671.45	50.33	704.38	43.40	-
5.94	Respuesta Inversa	50.00	367.88	16.26	477.17	16.12	-
11.83	Respuesta Inversa	50.00	104.07	1.54	269.27	1.95	-

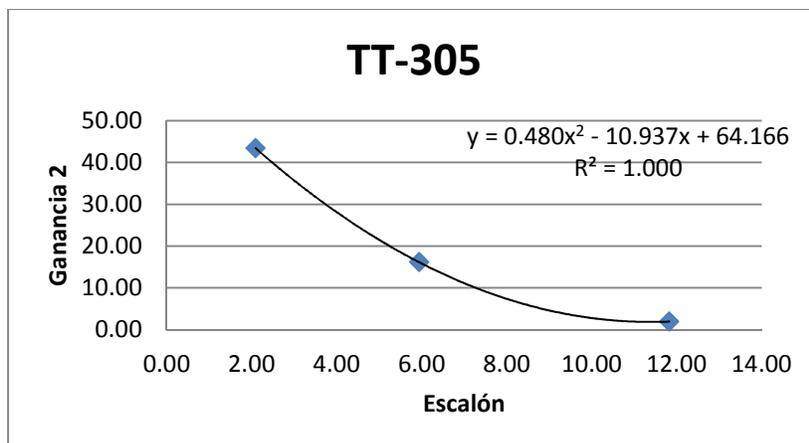




Gráfica A5-12.- Relación entre K_1 y el tamaño del escalón para el transmisor TT-305.

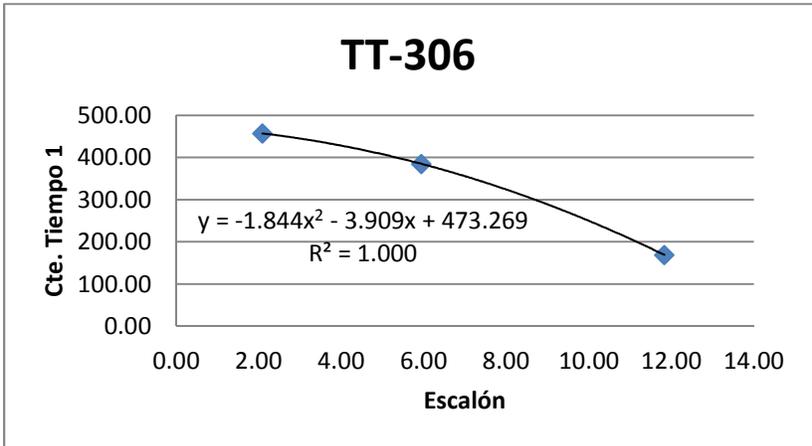


Gráfica A5-13.- Relación entre τ_2 y el tamaño del escalón para el transmisor TT-305.

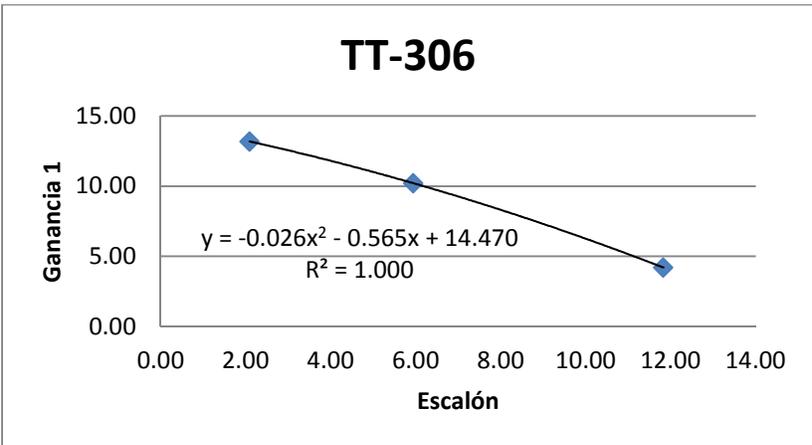


Gráfica A5-14.- Relación entre K_2 y el tamaño del escalón para el transmisor TT-305.

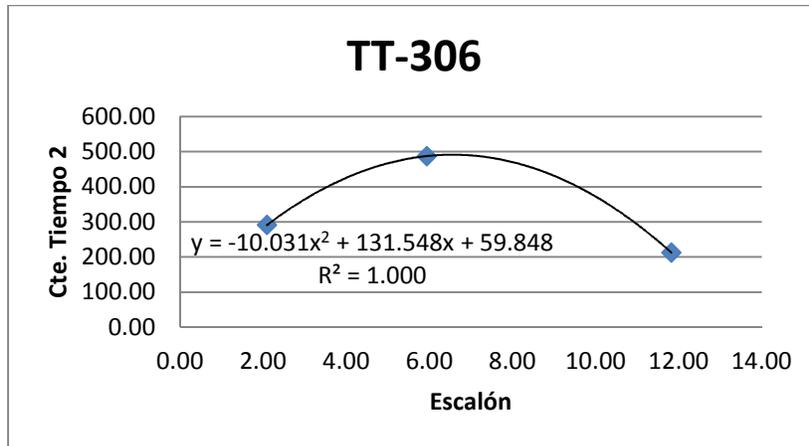
Tabla A5-5.- Relación entre el tamaño del escalón (perturbación) y los parámetros que conforman el modelo para el transmisor TT-306.							
Escalón [L/h]	Modelo	Tiempo muerto [segundos]	Constante tiempo 1	Ganancia 1	Constante tiempo 2	Ganancia 2	Factor de Amortiguamiento
2.09	Respuesta Inversa	60.00	457.04	13.18	291.01	6.27	-
5.94	Respuesta Inversa	65.00	384.93	10.21	487.33	9.08	-
11.83	Respuesta Inversa	60.00	169.03	4.21	212.39	4.00	-



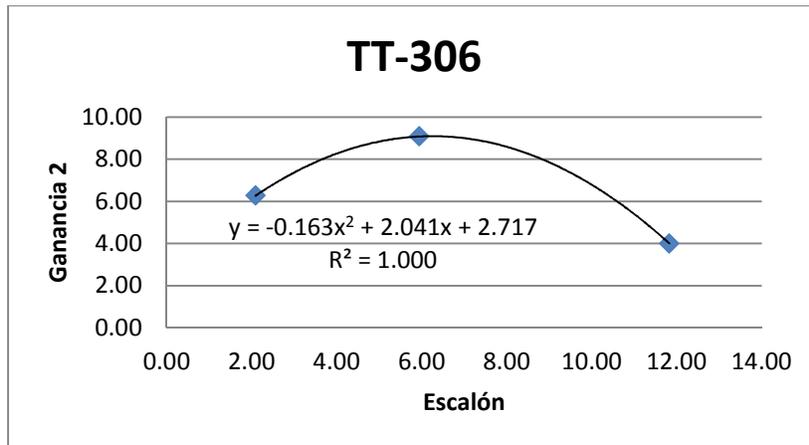
Gráfica A5-15.- Relación entre τ_1 y el tamaño del escalón para el transmisor TT-306.



Gráfica A5-16.- Relación entre K_1 y el tamaño del escalón para el transmisor TT-306.



Gráfica A5-17.- Relación entre τ_2 y el tamaño del escalón para el transmisor TT-306.



Gráfica A5-18.- Relación entre K_2 y el tamaño del escalón para el transmisor TT-306.

A partir del análisis anterior se creó un programa que calcula la respuesta observada en cada sensor ante perturbaciones en el flujo de alimentación de MEA-agua según el intervalo evaluado experimentalmente, es decir sólo para perturbaciones entre 2 y 12 L/h. En el programa sólo hace falta anotar los valores del tamaño de la perturbación y el tiempo transcurrido para el cual se desea conocer la respuesta en la columna.

Impresión de las líneas del programa hecho en Excel®+Visual Basic®:

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
Dim Esc As Double, tiempo As Double, iter As Double  
Esc = Cells(7, 4)  
Cells(8,4)="Tamaño Correcto"  
If Esc > 12 Then  
    Cells(8, 4) = "Tamaño fuera de los limites"  
End If  
If Esc < 2 Then  
    Cells(8, 4) = "Tamaño fuera de los limites"  
End If  
tiempo = Cells(11, 1)  
iter = 50  
N = tiempo / iter  
'Para TI-302  
Dim I As Integer, TI302(100) As Double, t302(100) As Double  
td302 = (25 + 15 + 15) / 3  
Taup302 = 815.888 * Esc ^ -0.6  
Kp302 = -0.065 * Esc ^ 2 + 1.47 * Esc - 9.294  
For I = 1 To iter  
    t302(0) = 0  
    t302(I) = t302(I - 1) + N  
    TI302(0) = 0  
    TI302(I) = Esc * Kp302 * (1 - Exp(-(t302(I) - td302) / Taup302))  
    If t302(I) < td302 Then  
        TI302(I) = 0
```

End If

Cells(11, 9) = TI302(I)

Cells(1 + I, 20) = t302(I - 1)

Cells(1 + I, 21) = TI302(I - 1)

Next

'Para TI-303

Dim J As Integer, TI303(100) As Double, t303(100) As Double

td303 = (30 + 25 + 20) / 3

Taup1303 = 1298.99 * Esc ^ -1.696

Kp1303 = 172.608 * Esc ^ -2.533

Taup2303 = -29.137 * Esc + 502.333

Kp2303 = 114.176 * Esc ^ -1.787

For J = 1 To iter

t303(0) = 0

t303(J) = t303(J - 1) + N

TI303(0) = 0

TI303(J) = Esc * (Kp1303 * (1 - Exp(-(t303(J) - td303) / Taup1303)) - Kp2303 * (1 - Exp(-(t303(J) - td303) / Taup2303)))

If t303(J) < td303 Then

TI303(J) = 0

End If

Cells(14, 9) = TI303(J)

Cells(1 + J, 22) = TI303(J - 1)

Next

'Para TI-304

Dim K As Integer, TI304(100) As Double, t304(100) As Double

td304 = (35 + 35 + 30) / 3

$$\text{Taup1304} = 2225.412 * \text{Esc} ^{-1.699}$$

$$\text{Kp1304} = 79.505 * \text{Esc} ^{-2.193}$$

$$\text{Taup2304} = -4.284 * \text{Esc} ^2 + 21.028 * \text{Esc} + 686.003$$

$$\text{Kp2304} = 49.104 * \text{Esc} ^{-1.59}$$

For K = 1 To iter

$$t304(0) = 0$$

$$t304(K) = t304(K - 1) + N$$

$$\text{TI304}(0) = 0$$

$$\text{TI304}(K) = \text{Esc} * (\text{Kp1304} * (1 - \text{Exp}(-(t304(K) - \text{td304}) / \text{Taup1304})) - \text{Kp2304} * (1 - \text{Exp}(-(t304(K) - \text{td304}) / \text{Taup2304})))$$

If t304(K) < td304 Then

$$\text{TI304}(K) = 0$$

End If

$$\text{Cells}(17, 9) = \text{TI304}(K)$$

$$\text{Cells}(1 + K, 23) = \text{TI304}(K - 1)$$

Next

'Para TI-305

Dim L As Integer, TI305(100) As Double, t305(100) As Double

$$\text{td305} = 50$$

$$\text{Taup1305} = 3.492 * \text{Esc} ^2 - 106.865 * \text{Esc} + 879.595$$

$$\text{Kp1305} = 0.651 * \text{Esc} ^2 - 14.078 * \text{Esc} + 76.913$$

$$\text{Taup2305} = 2.431 * \text{Esc} ^2 - 78.524 * \text{Esc} + 857.917$$

$$\text{Kp2305} = 0.48 * \text{Esc} ^2 - 10.937 * \text{Esc} + 64.166$$

For L = 1 To iter

$$t305(0) = 0$$

$$t305(L) = t305(L - 1) + N$$

$$\text{TI305}(0) = 0$$

```
TI305(L) = Esc * (Kp1305 * (1 - Exp(-(t305(L) - td305) / Taup1305)) - Kp2305 * (1 - Exp(-(t305(L) - td305) / Taup2305)))
```

```
If t305(L) < td305 Then
```

```
TI305(L) = 0
```

```
End If
```

```
Cells(20, 9) = TI305(L)
```

```
Cells(1 + L, 24) = TI305(L - 1)
```

```
Next
```

```
'Para TI-306
```

```
Dim M As Integer, TI306(100) As Double, t306(100) As Double
```

```
td306 = (60 + 65 + 60) / 3
```

```
Taup1306 = -1.844 * Esc ^ 2 - 3.909 * Esc + 473.269
```

```
Kp1306 = -0.026 * Esc ^ 2 - 0.565 * Esc + 14.47
```

```
Taup2306 = -10.031 * Esc ^ 2 + 131.548 * Esc + 59.848
```

```
Kp2306 = -0.163 * Esc ^ 2 + 2.041 * Esc + 2.717
```

```
For M = 1 To iter
```

```
t306(0) = 0
```

```
t306(M) = t306(M - 1) + N
```

```
TI306(0) = 0
```

```
TI306(M) = Esc * (Kp1306 * (1 - Exp(-(t306(M) - td306) / Taup1306)) - Kp2306 * (1 - Exp(-(t306(M) - td306) / Taup2306)))
```

```
If t306(M) < td306 Then
```

```
TI306(M) = 0
```

```
End If
```

```
Cells(23, 9) = TI306(M)
```

```
Cells(1 + M, 25) = TI306(M - 1)
```

```
Next
```

```
End Sub
```

BIBLIOGRAFÍA

- [1].- Treybal, Robert E.
Operaciones de transferencia de masa.
México, McGraw-Hill, 1985, Segunda Edición.
- [2].- Welty, James R.; Wicks, Charles E.; Wilson, Robert E.
Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa.
México, Limusa, 1999, Segunda Edición.
- [3].- Astarita, Giovanni
Mass transfer with chemical reaction.
Amsterdam, Elsevier, 1967.
- [4].- Kolev, Nikolai
Packed bed columns for absorption, desorption, rectification and direct heat transfer.
Amsterdam, Elsevier, 2006.
- [5].- McCabe, Warren L.
Operaciones unitarias en ingeniería química.
México, McGraw-Hill, c1991

- [6].- Geankoplis, Christie J.
Procesos de transporte y operaciones unitarias.
México, CECSA, 1998, Tercera Edición.
- [7].- Eckert, J.S.
Selecting the proper distillation column packing.
Chemical Engineering Progress, Vol. 66, No. 3, 1970.
- [8].- Danckwerts, P.V.
Gas-liquid reactions.
México, McGraw-Hill, 1970.
- [9].- Bird, R. Byron; Stewart, Warren E.; Lightfoot, Edwin N.
Fenómenos de transporte.
México, Reverte, 2006.
- [10].- Ogata, Katsuihiko
Ingeniería de control moderna.
México, Prentice Hall, 1988, Tercera Edición.

- [11].- Stephanopoulos, George
Chemical process control: an introduction to theory and practice.
New Jersey, Prentice Hall, 1984.
- [12].- Barragán, Fernando
Material didáctico para la materia "Dinámica y control de procesos".
Impartida en (2010) Facultad de Química, UNAM.
- [13].- Foust, Alan S.; et. Al.
Principios de Operaciones Unitarias
México, CECSA, 1987

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

MEA.- Se refiere a la sustancia mono-etanol-amina.

LIQ.- Se refiere a las instalaciones físicas del Laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la UNAM.

LIQ IV.- Se refiere a la materia Laboratorio de Ingeniería Química IV del actual plan de estudios de la carrera de Ingeniería Química impartida en la Facultad de Química de la UNAM.

DC.- Se refiere a la diferencia cuadrática que existe entre el modelo y los datos originales (ver ecuación 2.2.6).

MPO.- Se refiere al Modelo de Primer Orden (ver ecuación 2.2.3).

MSO-CA.- Se refiere al Modelo de Segundo Orden Críticamente Amortiguado (ver ecuación 2.2.5).

MSO-SOB.- Se refiere al Modelo de Segundo Orden Sobreamortiguado (2.2.4).

MRI.- Se refiere al Modelo de Respuesta Inversa (ver ecuación 2.2.7).