

09.74.02

C. N. E. A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 2	AÑO 1974

CNEA- RR- 2/161

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION
AREA RADIOISOTOPOS Y RADIACIONES

REGULADOR AUTOMATICO DE NIVEL DE LIQUIDOS,
POR ATENUACION DE RAYOS GAMMA

Antonio C. Castagnet - Ricardo J. Gillen - Casimiro J. Lazor
Guillermo E. Maggio

Departamento de Radioisótopos - División Aplicación

Buenos Aires, 1974

CONTENIDO

<u>SECCION</u>		<u>PAG.</u>
1.0.0	INTRODUCCION	2
2.0.0	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	2
3.0.0	PARAMETROS DE DISEÑO.....	7
3.1.0	Fluctuaciones estadísticas	9

Nota: Figuras y gráficos al final del texto.

RESUMEN

Se describe el principio de funcionamiento y la teoría de diseño de dispositivos basados en la atenuación de rayos gamma para el control automático del nivel de líquidos en recipientes, durante la evolución de un proceso industrial cualquiera.

1.0.0 INTRODUCCION

El objeto de un regulador de nivel es mantener automáticamente dentro de un intervalo prefijado, la altura de líquido en un tanque que forma parte de un proceso industrial continuo.

Los reguladores de nivel basados en la atenuación de rayos gamma se componen en general de los siguientes elementos (Fig. 1):

a) Una fuente radiactiva emisora de radiación gamma (^{60}Co ó ^{137}Cs) alojada en un blindaje adyacente a la pared del tanque que permite colimar los rayos hacia el sistema detector;

b) un sistema detector compuesto por uno o más tubos GM que pueden estar o no colimados respecto del haz de radiaciones, y que se instala a la misma altura que la fuente, en general, en forma diametralmente opuesta;

c) un integrador electrónico que convierte los n pulsos por segundo entregados por el detector en una tensión continua a la salida proporcional a la señal de entrada;

d) un circuito de control comandado por la tensión de salida del integrador, el cual excita un contactor;

e) un contactor que de acuerdo a su estado (trabajo o reposo) acciona una u otra de las válvulas solenoides de entrada o salida del líquido (V_E ó V_S).

El sistema fuente detector se instala a la altura media h_0 del intervalo en que se desea regular el nivel.

En esas condiciones existirán tres estados característicos del nivel respecto a la altura h_0 (Fig. 1):

N_1 : nivel por debajo de h_0

N_2 : nivel intermedio coincidente con h_0

N_3 : nivel por arriba de h_0

A cada uno de estos estados corresponderán n_1 , n_2 y n_3 cuentas por segundo (c/s) a la salida del detector.

2.0.0 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Si el colimador del detector tiene una abertura de $E(\text{cm})$, la representación gráfica de n (c/s) en función de la altura h (cm) de líquido en el tanque, afectará la forma ilustrada en la Fig. 2.

Este gráfico sería la curva de calibración estática del instrumento, es decir, la respuesta del detector en función del nivel de líquido, cuando para cada valor de h la medición se realiza durante un tiempo mucho mayor que la constante RC del integrador.

La tensión de salida del integrador correspondiente a n_2 podría utilizarse para comandar el circuito de control automático de las válvulas V_E y V_S .

En la práctica, en general, a igualdad de otras condiciones, el número de pulsos por segundo realmente indicados por el integrador y en consecuencia su tensión instantánea de salida, dependerá de la velocidad de variación del nivel.

Denominando n_i (c/s) al número de pulsos indicados por el integrador y $v = dh/dt$ (cm/s) a la velocidad de variación de nivel se tendrán las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} n &= f_1(h) && \text{(c/s)} \\ n_i &= f_2(n, RC, v) && \text{(c/s)} \\ n_i &= f_3(h, RC, v) && \text{(c/s)} \end{aligned}$$

En la Fig.3 se ha representado la forma de $n_i = f_3(h, RC, v)$ en función de h para RC constante y valores crecientes de la velocidad v de llenado.

Las curvas 1, 2 y 3 intersectan la señal n_2 que acciona el contactor, en valores crecientes de h respecto a la curva n de calibración estática.

Si se representara ahora $n_i = f_1(h)$ para v y RC constantes durante el llenado y vaciado del tanque, se obtendría un gráfico como el de la Fig.4.

Cuando la señal n_2 se utiliza efectivamente para la regulación del nivel, de tal manera que en el punto 1 de la curva se cierra V_E y se abre V_S , el gráfico de la Fig.4 sufrirá modificaciones que dependerán de las demandas de líquido durante el proceso, es decir, de las variaciones del caudal de salida Q_S en función del tiempo.

De cualquier manera el sistema mantendrá una regulación del nivel alrededor de h_0 entre un límite superior h_1 y uno inferior h_2 , los cuales variarán en función de Q_E , Q_S y RC.

La diferencia de niveles $\Delta h_0 = h_1 - h_2$ se suele denominar ancho de banda. De acuerdo a las características del proceso donde se instala el regulador de nivel, convendrá tener la posibilidad de variar con facilidad, dentro de ciertos límites, el ancho de banda. Normalmente este control se ejecuta a través de la constante de tiempo RC del integrador.

A modo de ejemplo vamos a calcular la máxima altura h_1 a que puede llegar el líquido, partiendo del tanque vacío con un caudal de llenado constante igual a Q_E , y con una constante de tiempo RC.

En el entorno

$$h_0 - \frac{E}{2} \leq h \leq h_0 + \frac{E}{2} \quad (1)$$

la función $n(h)$ se puede expresar como:

$$n = n_1 - \frac{(n_1 - n_3)}{E} \left[h - \left(h_0 - \frac{E}{2} \right) \right] \quad (c/s) \quad (2)$$

Denominando

$$S = \frac{n_1 - n_3}{E} \quad (c/s \cdot cm) \quad (3)$$

$$\Delta h = h - \left(h_0 - \frac{E}{2} \right) \quad (cm) \quad (4)$$

en donde S representa la sensibilidad de medición, resulta:

$$n = n_1 - S \cdot \Delta h \quad (c/s) \quad (5)$$

En el entorno definido por la ecuación (1):

$$\frac{dn}{dt} = - S \frac{dh}{dt} = - S \cdot v \quad (c/s^2) \quad (6)$$

siendo v la velocidad constante dh/dt a la que sube el líquido.

El número n_i de cuentas por segundo indicado a la salida del integrador, o lo que es equivalente, su tensión de salida V , variará en función del tiempo acercándose exponencialmente al valor dado por la ecuación (6):

$$\frac{dn_i}{dt} = \frac{dn}{dt} (1 - e^{-t/RC}) \quad (c/s^2) \quad (7)$$

donde t es el tiempo transcurrido en segundos desde que se inició la variación de n .

Reemplazando la ecuación (6) en la (7):

$$\frac{dn_i}{dt} = - S \cdot v (1 - e^{-t/RC}) \quad (c/s^2) \quad (8)$$

Integrando entre 0 y t :

$$n_i(t) = n_1 - S \cdot v \cdot t + S \cdot v \cdot RC (1 - e^{-t/RC}) \quad (c/s) \quad (9)$$

Como:

$$\Delta h = v \cdot t$$

la ecuación (5) queda

$$n(t) = n_1 - S \cdot v \cdot t \quad (\text{c/s}) \quad (10)$$

y finalmente reemplazando en la ecuación (9):

$$n_i(t) = n(t) + S \cdot v \cdot RC (1 - e^{-t/RC}) \quad (\text{c/s}) \quad (11)$$

En tanto $n_i(t) > n_2$ el tanque continuará llenándose con el caudal Q_E , subiendo el nivel a la velocidad $v = dh/dt$.

$$\text{Para } h_b < h < h_o + \frac{E}{2}:$$

$$h = h_o - \frac{E}{2} + \Delta h \quad (\text{cm})$$

$$t = \frac{\Delta h}{v} \quad (\text{s})$$

$$n(t) = n(h) = n_1 - S \cdot \Delta h \quad (\text{c/s})$$

$$n_i(h) = n_1 - S \cdot \Delta h + S \cdot v \cdot RC (1 - e^{-\Delta h/v \cdot RC}) \quad (\text{c/s}) \quad (12)$$

Si $v \cdot RC$ es pequeño respecto a E ; $n_i(h)$ puede llegar al valor n_2 para un $h_1 \leq h_o + E/2$.

El máximo Δh ocurrirá cuando

$$\Delta h = \Delta h_{\text{máx}} = h_1 - (h_o - \frac{E}{2})$$

en cuyo caso:

$$n_i(h) = n_2 = n_1 - S \cdot \Delta h_{\text{máx}} + S \cdot v \cdot RC (1 - e^{-\Delta h_{\text{máx}}/v \cdot RC}) \quad (\text{c/s}) \quad (13)$$

Como:

$$n_2 = \frac{n_1 + n_3}{2} \quad (\text{c/s}) \quad (14)$$

$$S = \frac{n_1 - n_3}{E} \quad (\text{c/s.cm})$$

reemplazando estas expresiones en la ecuación (13):

$$\frac{\Delta h_{\text{máx}}}{v \cdot RC} + e^{-\Delta h_{\text{máx}}/v \cdot RC} = \frac{E}{2v \cdot RC} + 1 \quad (15)$$

Esta ecuación es válida siempre que

$$\Delta h_{\text{máx}} \leq E$$

El límite de aplicación de la ecuación (15) se tendrá cuando $\Delta h_{\text{máx}} = E$ pues a partir de ese valor $n(t) = n_3 = \text{cte.}$

Reemplazando en la ecuación (15) $\Delta h_{\text{máx}}$ por E se tiene:

$$\frac{E}{v \cdot RC} + e^{-E/v \cdot RC} = \frac{E}{2v \cdot RC} + 1$$

$$\frac{E}{v \cdot RC} + 2e^{-E/v \cdot RC} = 2$$

la cual se satisface para

$$\frac{E}{v \cdot RC} = 1,6$$

Por lo tanto la ecuación (15) que define el máximo valor de h_1 será aplicable sólo si $E/v \cdot RC \geq 1,6$; es decir si $\Delta h_{\text{máx}} \leq E$.

Si $E/v \cdot RC < 1,6$; $n_i(t)$ alcanzará el valor n_2 para $\Delta h_{\text{máx}} > E$.

A partir del instante en que $h = h_0 + E/2$ ($\Delta h = E$), $n(t)$ permanecerá constante e igual a n_3 . Por su parte $n_i(h)$ tenderá asintóticamente a dicho valor n_3 .

Para $\Delta h = E$; ($t = E/v$; $h = h_0 + E/2$) se obtiene de la ecuación (12):

$$n_i(h_0 + \frac{E}{2}) = n_3 + S \cdot v \cdot RC (1 - e^{-E/v \cdot RC}) \quad (\text{c/s}) \quad (17)$$

De ahí en adelante la variación de n_i en función del tiempo será:

$$n_i(t) = n_i(h_0 + \frac{E}{2}) - \left[n_i(h_0 + \frac{E}{2}) - n_3 \right] (1 - e^{-t/RC}) \quad (\text{c/s}) \quad (18)$$

$$n_i(h) = n_i(h_0 + \frac{E}{2}) - \left[n_i(h_0 + \frac{E}{2}) - n_3 \right] \left[1 - e^{-(\Delta h - E)/v \cdot RC} \right] (\text{c/s}) \quad (19)$$

y por la ecuación (17):

$$n_i(h) = n_3 + S.v.RC (1 - e^{-E/v.RC}) e^{-(\Delta h - E)/v.RC} \quad (c/s) \quad (20)$$

donde t representa ahora el tiempo transcurrido en segundos, desde el instante en que $h = h_0 + E/2$.

Consecuentemente con lo dicho antes, las ecuaciones (18) y (19) serán sólo aplicables si $n_i(h_0 + E/2) < n_2$.

El máximo nivel alcanzado por el líquido en este caso se obtendrá nuevamente haciendo en la ecuación (20) $n_i(h) = n_2$ y teniendo en cuenta las expresiones (3), (14) y (17); resulta:

$$e^{-(\Delta h_{\text{máx}} - E)/v.RC} = \frac{E}{2.v.RC (1 - e^{-E/v.RC})} \quad (21)$$

$$e^{-\Delta h_{\text{máx}}/v.RC} = \frac{1}{2} \cdot \frac{E}{v.RC} \cdot \frac{1}{(e^{E/v.RC} - 1)} \quad (22)$$

Haciendo en las ecuaciones (15) y (22):

$$\frac{\Delta h_{\text{máx}}}{v.RC} = y$$

$$\frac{E}{v.RC} = x$$

se obtiene respectivamente:

para $x \geq 1,6$

$$y + e^{-y} = \frac{x}{2} + 1 \quad (15)$$

para $x < 1,6$

$$e^{-y} = \frac{1}{2} \cdot \frac{x}{(e^x - 1)} \quad (22)$$

3.0.0 PARAMETROS DE DISEÑO

En la Fig. 5 se han representado en un mismo gráfico los valores de:

$\Delta h_{\text{máx}}/v \cdot RC$ en función de $E/v \cdot RC$ para las ecuaciones (15) y (22) teniendo en cuenta el rango de validez de cada una.

Dicho gráfico permite determinar $\Delta h_{\text{máx}}$ (cm) y con ello el máximo nivel h_1 (cm) de llenado:

$$h_1 = h_0 - \frac{E}{2} + \Delta h_{\text{máx}} \quad (\text{cm}) \quad (23)$$

en función de los parámetros E (cm) y RC (s) para un proceso donde el tanque se llena a una velocidad constante $dh/dt = v$ (cm/s).

Supongamos un caso donde:

$$\begin{aligned} E &= 1 \text{ cm} \\ v &= 0,5 \text{ cm/s} \\ RC &= 4 \text{ s} \end{aligned}$$

Por lo tanto:

$$\frac{E}{v \cdot RC} = \frac{1}{2} = 0,5$$

Del gráfico:

$$\Delta h/v \cdot RC = 0,94 \text{ y } \Delta h = 0,94 v \cdot RC = 0,94 \cdot 0,5 \text{ cm/s} \cdot 4 \text{ s} = 1,98 \text{ cm}$$

De la ecuación (23): $h_1 = h_0 + 1,48 \text{ cm}$
En cambio si

$$\begin{aligned} E &= 1 \text{ cm} \\ v &= 0,1 \text{ cm/s} \\ RC &= 1 \text{ s} \end{aligned}$$

resulta:

$$E/v \cdot RC = 10 \text{ y } \Delta h = 6 \cdot 0,1 \text{ cm/s} \cdot 1 \text{ s} = 0,6 \text{ cm y } h_1 = h_0 + 0,1 \text{ cm}$$

Para predecir el mínimo nivel h_2 cuando el tanque se vacía a velocidad constante partiendo de un nivel mayor o igual que $h_0 + E/2$ (encontrándose la señal n_1 estabilizada en el valor n_3) se puede aplicar un razonamiento similar al descrito.

Las fórmulas (15) y (22) y el gráfico de la figura 5 servirán ahora para calcular el $\Delta h_{\text{mín}}$ (en lugar del $\Delta h_{\text{máx}}$), el cual se cuenta hacia la izquierda a partir de h_1 en la figura 4.

$$h_2 = h_0 + E/2 - \Delta h_{\text{mín}} \quad (\text{cm}) \quad (24)$$

Restando las expresiones (23) y (24) se obtiene el ancho de banda para las condiciones supuestas:

$$h_1 - h_2 = \Delta h_{\text{máx}} + \Delta h_{\text{mín}} - E \quad (\text{cm}) \quad (25)$$

3.1.0 FLUCTUACIONES ESTADÍSTICAS

En la practica, debido a las fluctuaciones estadísticas que acompañan a la señal n_i , los valores $\Delta h_{\text{máx}}$ y $\Delta h_{\text{mín}}$ y en consecuencia el ancho de banda $h_1 - h_2$ también variará estadísticamente.

A igualdad de otros parámetros las fluctuaciones del ancho de banda, en valor absoluto, serán tanto mayores cuanto menor sea la constante de tiempo RC.

Siendo σ_{n_i} la desviación "standard" de n_i , la máxima fluctuación estadística de n_i puede suponerse igual a:

$$\Delta n_i = \pm 3 \sigma_{n_i} \quad (\text{c/s})$$

Las consiguientes variaciones máximas posibles de $\Delta h_{\text{máx}}$ y $\Delta h_{\text{mín}}$ serán:

$$\Delta (\Delta h_{\text{máx}}) = \pm \left(\frac{3 \sigma_{n_i}}{\partial n_i / \partial h} \right)_{n_i = n_2} \quad (\text{cm}) \quad (26)$$

$$\Delta (\Delta h_{\text{mín}}) = \pm \left(\frac{3 \sigma_{n_i}}{\partial n_i / \partial h} \right)_{n_i = n_2} \quad (\text{cm}) \quad (27)$$

En estas expresiones:

$$(\sigma_{n_i})_{n_i = n_2} = \sigma_{n_2} = \sqrt{\frac{n_1 + n_3}{2}} = \sqrt{\frac{n_1 (1 + e^{-u\phi p})}{2}} \quad (28)$$

donde:

u = coeficiente másico de atenuación de la radiación en el líquido que llena el tanque (cm^2/g);

ϕ = diámetro interior del tanque (cm)

p = densidad del líquido (g/cm^3)

La derivada:

$$\left(\frac{\partial n_i}{\partial h} \right)_{n_i = n_2}$$

deberá calcularse por las ecuaciones (15) y (22) según el caso. -

BIBLIOGRAFIA

Castagnet, A.C. ; Gillen, R.J. ; Lazor, C.J ; Maggio, G.E. "Medición de nivel con radioisótopos"; CNEA, RR-1/139 (1974). -

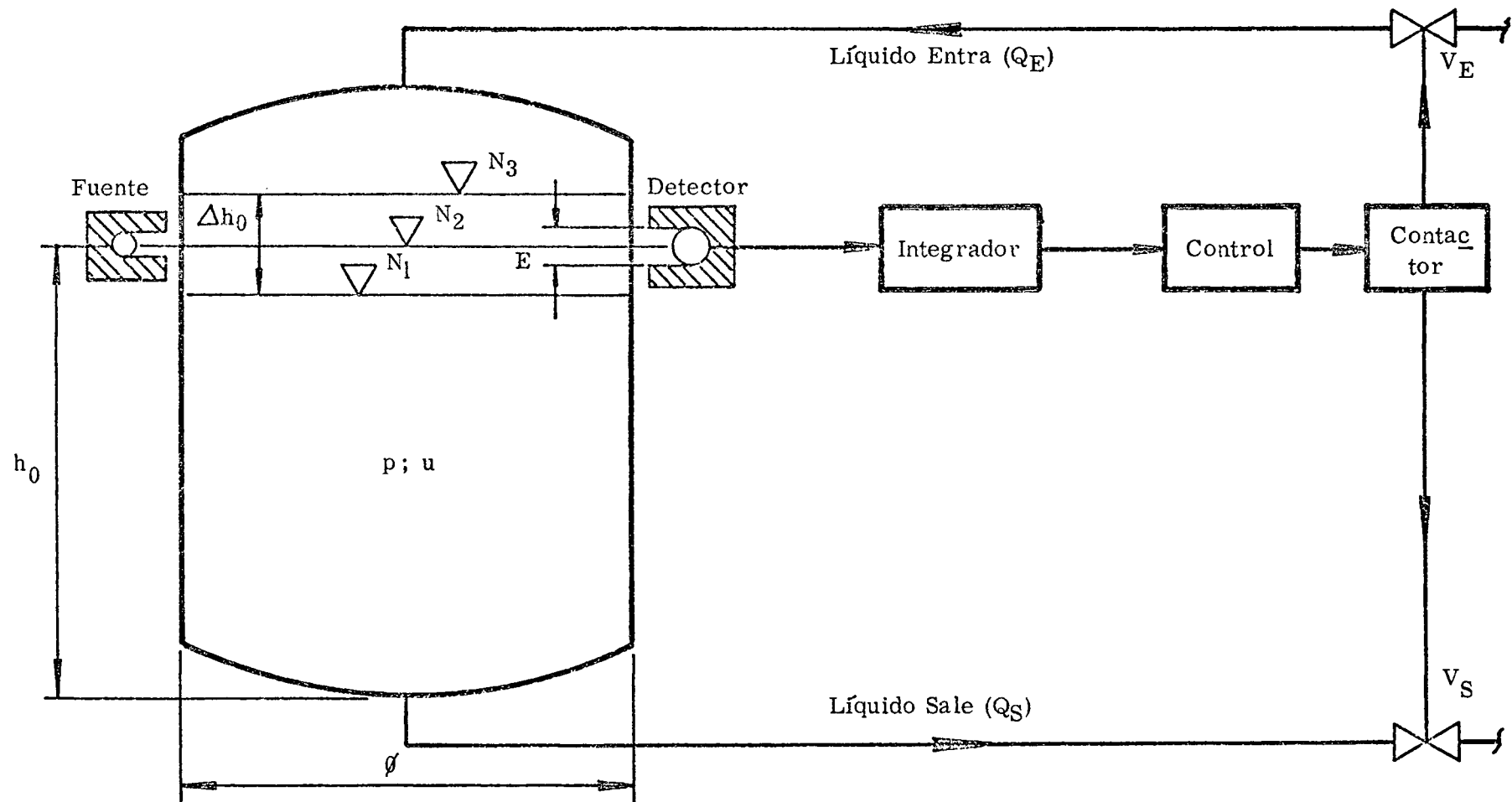


Fig.1 Esquema y notación para el estudio de un regulador de nivel. -

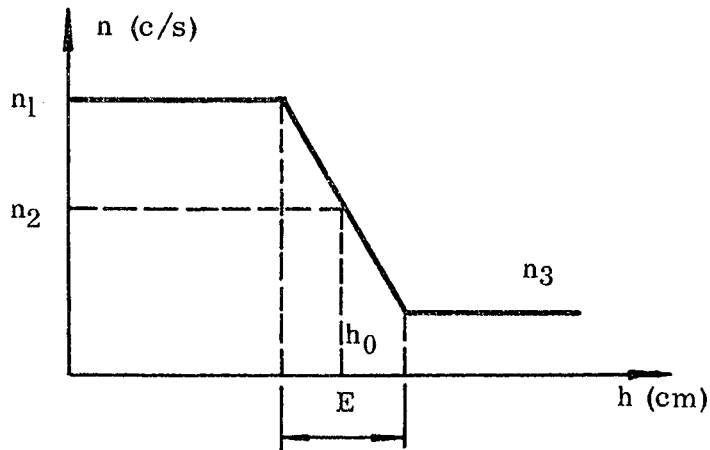


Fig. 2 Representación gráfica de $n = f(h)$

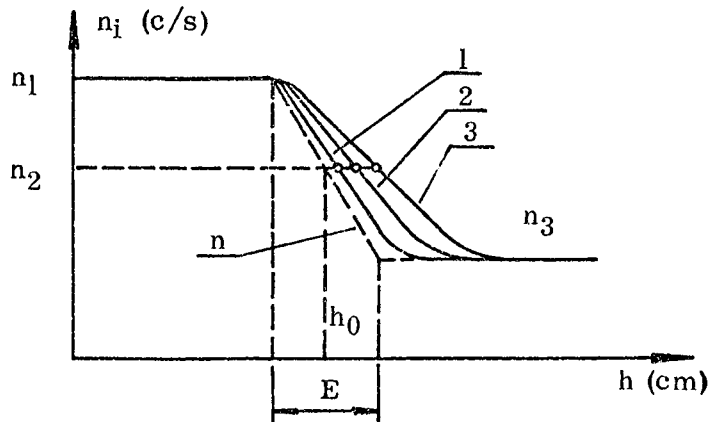


Fig. 3 Respuesta del integrador bajo condiciones dinámicas, para velocidades crecientes de llenado y $RC = \text{constante}$ ($v_1 < v_2 < v_3$)

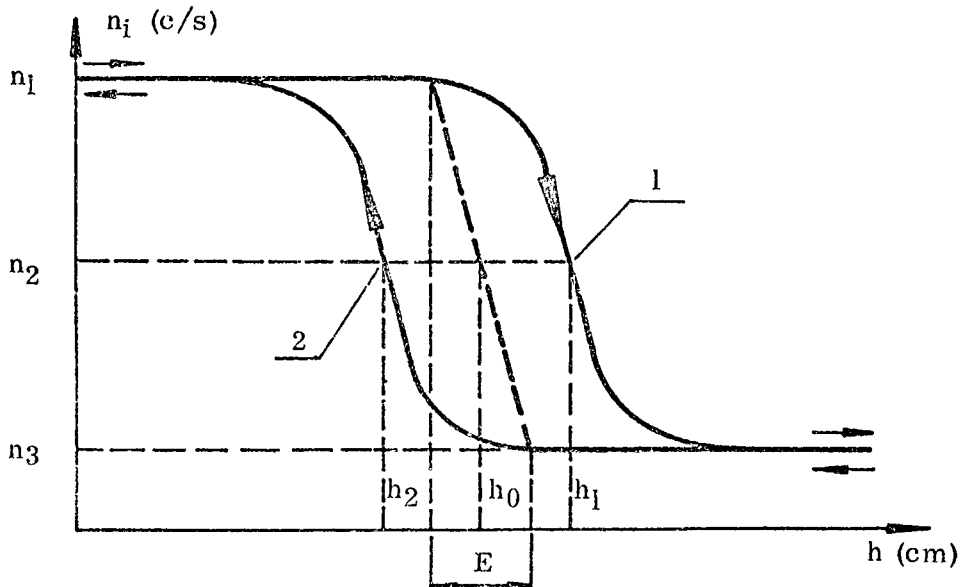


Fig. 4 Gráfico de $n_i = f(h)$ durante el llenado y vaciado del tanque a caudal constante, para un dado valor de RC .

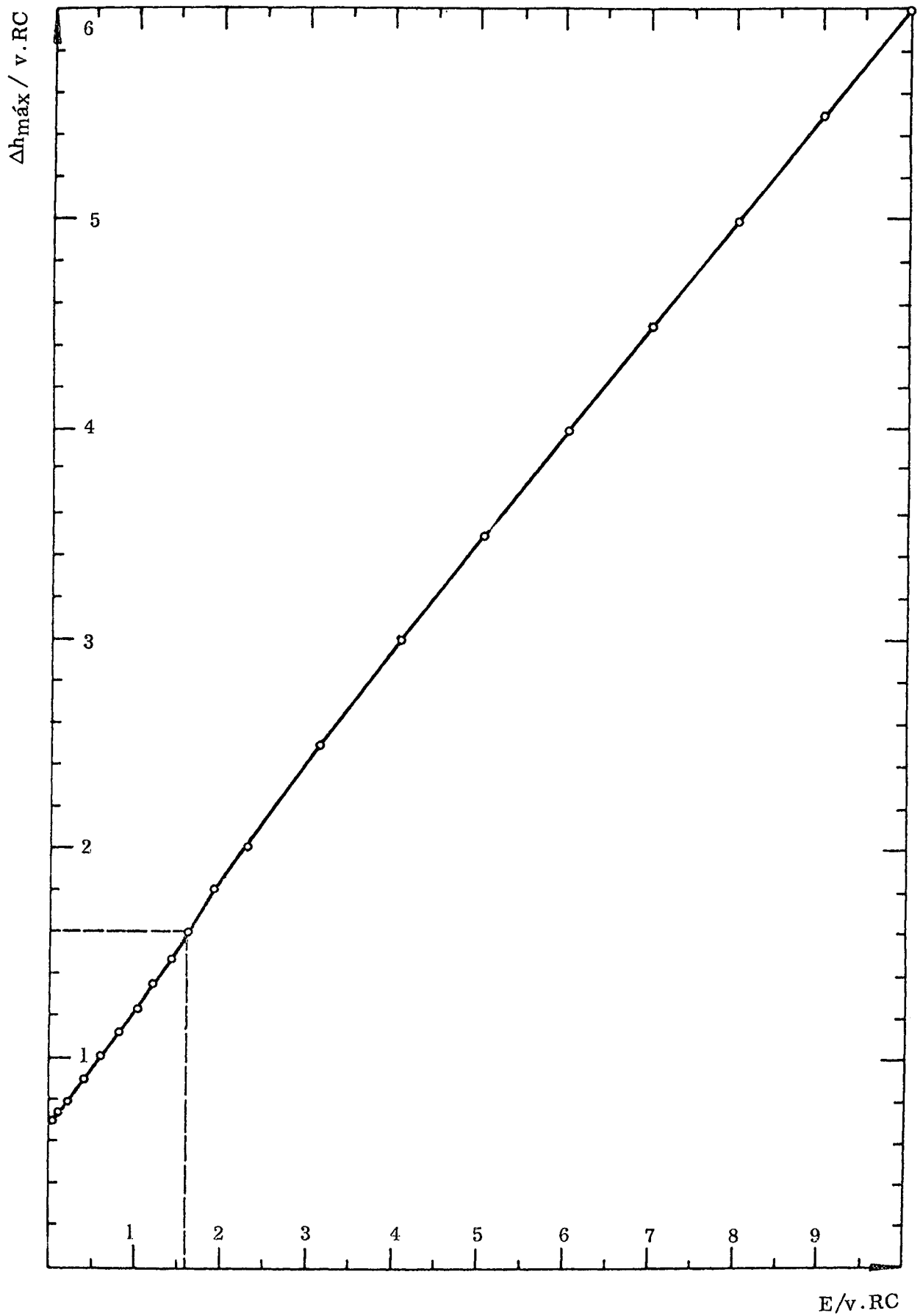


Fig. 5 Gráfico de la relación $\Delta h_{\text{máx}}/v.RC$ en función de $E/v.RC$