



CINVESTAV-IPN
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS AVANZADOS DEL IPN

**LABORATORIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y CIENCIAS DE
LA COMPUTACIÓN**

**CONTROL DE UN SISTEMA DE DOS
TANQUES PARA ALMACENAMIENTO
DE LÍQUIDOS**

TESIS QUE PRESENTA
ING. CARLOS ALBERTO HERNÁNDEZ RAMÍREZ

PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS

EN LA ESPECIALIDAD DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA



Guadalajara, Jal., 1997

CLASIF.:
ADQUIS. DEPTO. SERV. BIBL.
FECHA: 18-V-98
PROCED.: TESIS-1998
\$

Director de Tesis:

Dra. Ofelia Begovich Mendoza

AGRADECIMIENTOS

Al CINVESTAV-IPN y al CINVESTAV-IPN unidad Guadalajara por darme la oportunidad de estudiar esta maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por sus apoyos económicos proporcionados para la realización de esta tesis.

A mis padres por darme todo su Amor y Apoyo durante todos los años de mi vida.

A mi novia Rossy, por Apoyarme y Comprenderme.

A la Dra. Ofelia Begovich Mendoza por su ejemplo de disciplina y por la dirección de esta tesis.

A mis compañeros de generación por esos grandes momentos.

A los Doctores Antonio Ramírez Treviño, Bernardino Castillo Toledo, Arturo Sánchez Carmona y Edgar N. Sánchez Camperos.

Al Ing. Humberto Bracamontes del Toro del Instituto Tecnológico de Cd. Guzmán y al M.C. Luis Enrique Ramos del CINVESTAV Guadalajara, por su ayuda en este proyecto.

Al CETI por su apoyo tecnológico en la realización de esta tesis. Y a todos aquellos que me brindaron su apoyo durante esta etapa de mi vida.

Gracias.

Índice General

1	Introducción	5
1.1	Plan de Trabajo	6
2	Características del Sistema	7
2.1	Elementos del Sistema Hidráulico	7
2.2	Adquisición y Procesamiento de Datos	10
3	Modelo Dinámico del Sistema Hidráulico	13
3.1	Modelo Dinámico No Lineal	14
3.1.1	Masa Total Dentro del Tanque	14
3.1.2	Balance Total de Masa en un Tanque	14
3.1.3	Balance de Energía	15
3.2	Linealización del Modelo Dinámico	15
3.3	Modelo Dinámico de la Válvula	16
3.4	Modelos en Variables de Estado	18
3.4.1	Subsistema Tanque-Válvula	18
3.4.2	Sistema de los Dos Tanques	19
4	Diseño e Implementación	23
4.1	Introducción	23
4.1.1	Especificaciones de Diseño	23
4.1.2	Escenarios de Prueba de los Controladores	24
4.2	Controlador <i>Todo-Nada</i>	24
4.3	Controlador <i>Proporcional P</i>	28
4.4	Controlador <i>Proporcional Integral PI</i>	32
4.5	Controlador <i>LQ</i>	34
4.5.1	Preliminares Sobre el Control <i>LQ</i> [2], [11]	39

4.5.2	Controlador LQ para un Subsistema Tanque-Válvula .	40
4.5.3	Controlador LQ para el Sistema de los Dos Tanques . .	47
4.5.4	Comentarios Sobre el Diseño de Controladores LQ . . .	53
5	Conclusiones y Comentarios	55
A	Ecuación de <i>Bernuolli</i>	59
B	Referencias Técnicas de la Identificación	61
C	Sistema de Dos Tanques Hidráulicos	63
D	Método de ajuste <i>Ziegler-Nichols</i>	71
E	Modelo Interno	75

Índice de Figuras

2.1	Estructura Reconfigurable	8
2.2	Tanque Utilizado	9
2.3	Configuración en cascada	10
3.1	Configuración del subsistema y el equipo de medición utilizados en la identificación paramétrica	17
3.2	Respuesta del flujo de salida de la válvula vs tiempo	17
4.1	Configuración del sistema de control en lazo cerrado	25
4.2	Respuestas de los niveles en tiempo real obtenidas con el controlador <i>Todo-Nada</i>	26
4.3	Oscilación del nivel como consecuencia del retardo y dinámica que presenta la válvula	27
4.4	Respuestas de los niveles en tiempo real obtenidas con el controlador <i>P</i>	29
4.5	Señal de control hacia el actuador de la válvula 1	30
4.6	Señal de control hacia el actuador de la válvula 2	31
4.7	Respuestas en tiempo real de los niveles con el controlador <i>P</i> al aplicarle perturbaciones tipo escalón " <i>Pesc 1</i> " y " <i>Pesc 2</i> "	33
4.8	Respuestas en tiempo real de los niveles obtenidas con el controlador <i>PI</i>	35
4.9	Señal de control hacia el actuador de la válvula 1	36
4.10	Señal de control hacia el actuador de la válvula 2	37
4.11	Respuestas en tiempo real de los niveles con el controlador <i>PI</i> al aplicarle perturbaciones tipo escalón " <i>Pesc 1</i> " y " <i>Pesc 2</i> "	38
4.12	Configuración de Control en Lazo Cerrado	41
4.13	Respuestas de los niveles en la simulación con controladores <i>LQ</i>	42
4.14	Respuestas en tiempo real de los niveles obtenidas del controlador <i>LQ</i>	43

4.15	Señal de control hacia el actuador de la válvula 1	44
4.16	Señal de control hacia el actuador de la válvula 2	45
4.17	Respuestas en tiempo real de los niveles con el controlador <i>LQ</i> al aplicarle perturbaciones tipo escalón “ <i>Pesc 1</i> ” y “ <i>Pesc 2</i> ” .	46
4.18	Respuesta de los niveles en la simulación con el controlador <i>LQ Multivariable</i>	48
4.19	Respuestas en tiempo real de los niveles obtenidas con el con- trolador <i>LQ Multivariable</i>	49
4.20	Señal de control hacia el actuador de la válvula 1	50
4.21	Señal de control hacia el actuador de la válvula 2	51
4.22	Respuestas en tiempo real de los niveles con el controlador <i>LQ</i> <i>multivariable</i> al aplicarle perturbaciones tipo escalón “ <i>Pesc 1</i> ” y “ <i>Pesc 2</i> ”	52
A.1	Diagrama de energía de una tubería con un fluido que atraviesa las fronteras	60
D.1	Oscilación del nivel, bajando el punto de operación un 10 % y variando el valor de la ganancia del controlador <i>P</i>	72
E.1	Diagrama a bloques de la ecuación de balance de masa	76
E.2	Diagrama a bloques equivalente de la ecuación de balance de masa	76

Capítulo 1

Introducción

En los procesos industriales, donde los sistemas hidráulicos son una parte fundamental, una de las variables más importantes a controlar en estos sistemas es el nivel precedida en importancia por el control de temperatura.

La mayoría de los sistemas hidráulicos son utilizados en diversos procesos. Algunos de ellos son: embotellado, fermentación, producción de alimentos, refinación de azúcar, generación de energía eléctrica, etc., existen, entre muchos otros subsistemas, tanques para almacenamiento de fluidos, en los cuales un objetivo primordial es la regulación de nivel. Para cumplir con este objetivo se cuenta con sistemas de control automático, donde los controladores más utilizados son los del tipo *Todo-Nada*, *P*, *PI* [6], [8] y [15], y en muy pocas ocasiones controladores diseñados con técnicas de control modernas tales como *Control Óptimo* [13] y *Control Predictivo* [12], donde los experimentos son mostrados únicamente en simulación.

Dada la importancia del control de nivel de fluidos en la industria, en esta tesis se realiza un caso de estudio sobre un prototipo, conformado por dos tanques para almacenamiento de fluidos [7]. Básicamente este caso de estudio consiste en diseñar e implementar algoritmos de control automático, con el fin de obtener información que permitan valorar los alcances de cada controlador, y de esta manera ofrecer caminos alternativos para posibles aplicaciones en procesos industriales reales parecidos a dicho prototipo.

1.1 Plan de Trabajo

El trabajo esta organizado de la siguiente manera:

En el Capítulo 2 se presentan las características generales que conforman el sistema.

En el Capítulo 3 se muestra la obtención de dos Modelos Matemáticos, uno para el subsistema tanque-válvula y en seguida para el sistema de los dos tanques. Para ello se linealizó las ecuaciones diferenciales: balance de masa y energía, y se obtuvo el modelo matemático para cada válvula a través de técnicas de identificación paramétrica.

En el Capítulo 4 se da inicio al caso de estudio en donde se *Diseñan e Implementan* una serie de controladores tales como: *Todo-Nada*, *P*, *PI* y *LQ* para cada subsistema tanque-válvula, así como un controlador *LQ* para el sistema de los dos tanques, además se muestran las gráficas de las respuestas en tiempo real de la aplicación de cada uno de los controladores.

En el Capítulo 5 se exponen en forma general las conclusiones acerca de los resultados obtenidos, así como algunos comentarios sobre este caso de estudio y proyectos futuros a realizar sobre este prototipo.

En el *Apéndice A*, se presenta en forma detallada el desarrollo de la ecuación de *Bernuolli*.

En el *Apéndice B*, se presenta una explicación y carateristicas de los equipos utilizados para la identificación de la válvula.

En el *Apéndice C*, se presenta el artículo publicado en el congreso nacional CIE97 organizado en México D.F por el CINVESTAV, el cual es fruto de la investigación realizada en este trabajo de tesis.

En el *Apéndice D*, se muestra el método de ajuste *Ziegler-Nichols* y los resultados obtenidos para este trabajo.

En el *Apéndice E*, se presenta el principio del *Modelo Interno* y la aplicación de éste para este caso en particular.

Capítulo 2

Características del Sistema

El sistema bajo estudio es el sistema hidráulico mostrado en la figura 2.1 conformado por dos tanques para almacenamiento de fluidos, interconectados a través de dos válvulas industriales y cuya configuración hidráulica puede ser modificada. La información relacionada con la construcción de este sistema hidráulico y características técnicas de todos los equipos relacionados con el mismo, puede ser encontrado en el reporte de infraestructura [7], el cual es fruto de un proyecto para construir prototipos de sistemas para el laboratorio de control del CINVESTAV-Guadalajara. La configuración hidráulica que se adoptó es la de cascada, con las válvulas conectadas a la salida de cada tanque, tal y como se muestra en la figura 2.3. Cabe mencionar, que la configuración en cascada es una de las más utilizadas en los procesos de almacenamiento y manejo de líquidos, razón por la cual fue elegida para realizar dicho caso de estudio.

2.1 Elementos del Sistema Hidráulico

A continuación se presenta una breve descripción de los elementos que constituyen el prototipo bajo estudio.

1. *Computadora personal (PC)* para la adquisición y procesamiento de datos así como el control del sistema.

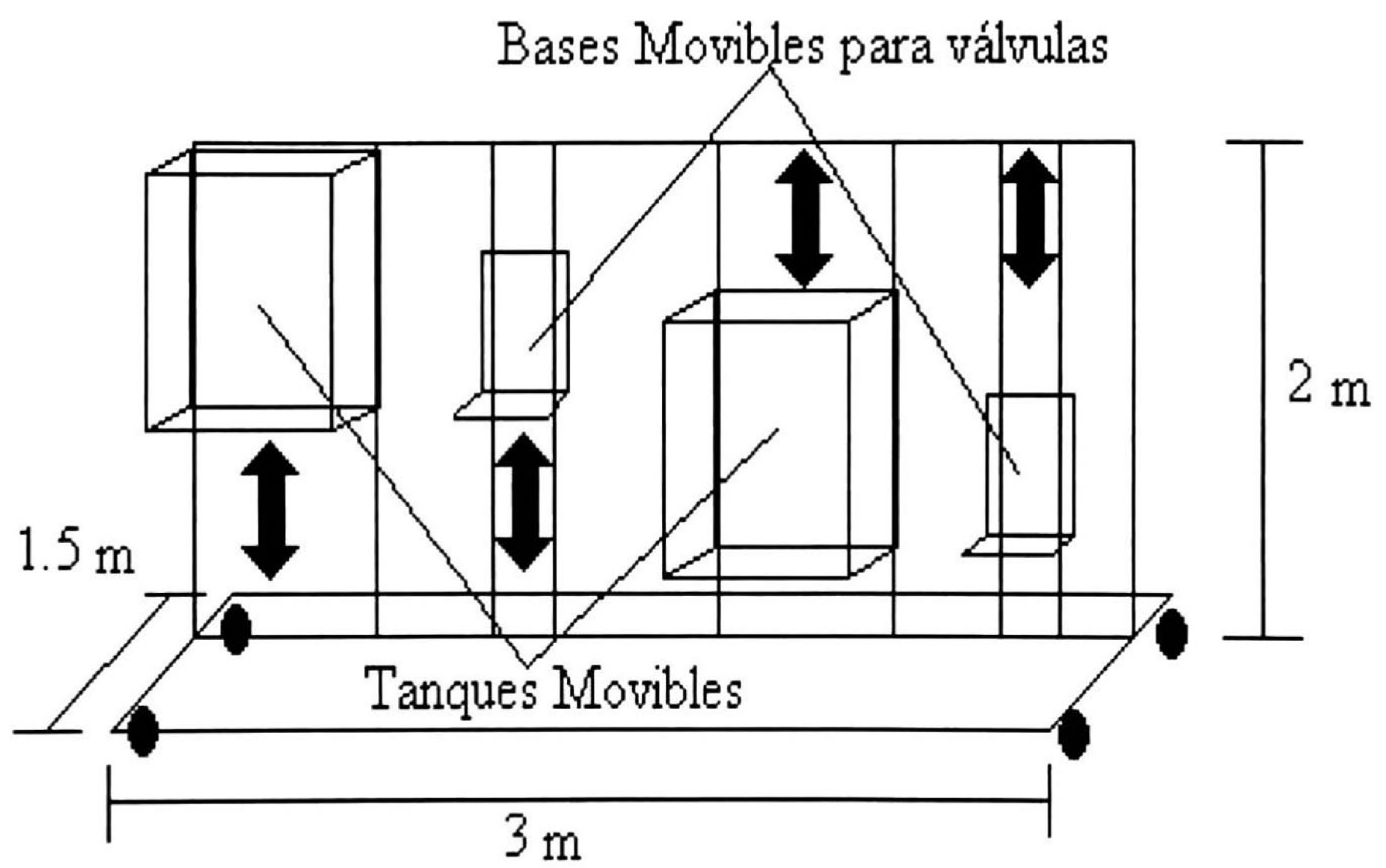


Figura 2.1: Estructura Reconfigurable

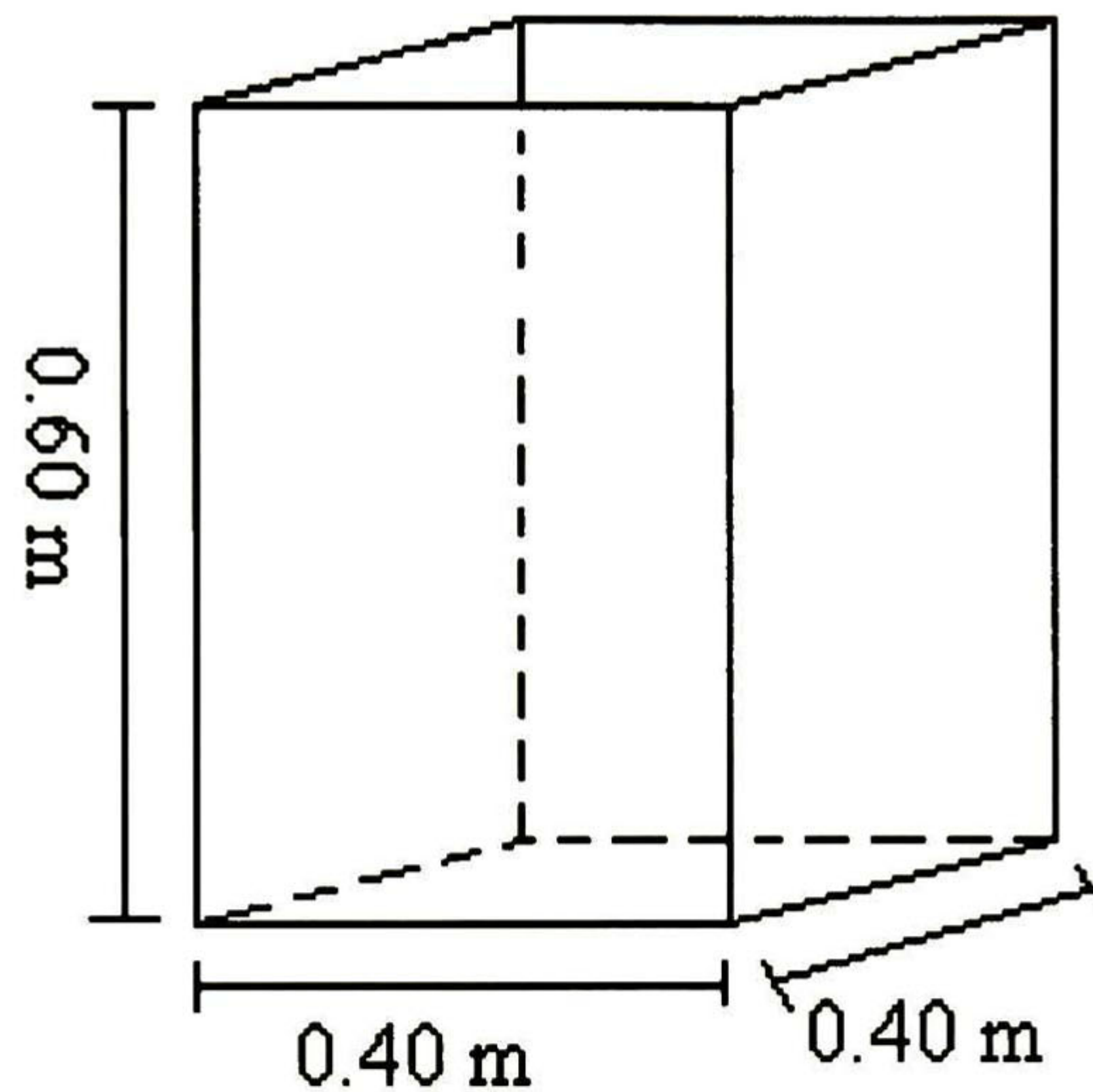


Figura 2.2: Tanque Utilizado

2. *Tanques (2)* de acrílico para un volumen de 96 l, con escala graduada en centímetros, cuya geometría y dimensiones se muestran en la figura 2.2.
3. *Válvulas (2)* electromecánicas de tipo industrial marca *Honeywell*, con características: *Sello simple* y *Flujo isoporcentual*, las cuales guardan un relación lineal entre la apertura de la válvula y la señal de corriente.
4. *Sensores (2)* transductores de presión diferencial piezoresistivos sumergible marca *WIKA*, con una relación lineal entre el nivel y la corriente.
5. *Recirculación del agua* constituida por un depósito de agua y una bomba sumergible de 0.367 litros/seg para una altura máxima de 3 metros.

La configuración hidráulica del sistema y la ubicación física de los elementos antes mencionados se muestran en la figura 2.3.

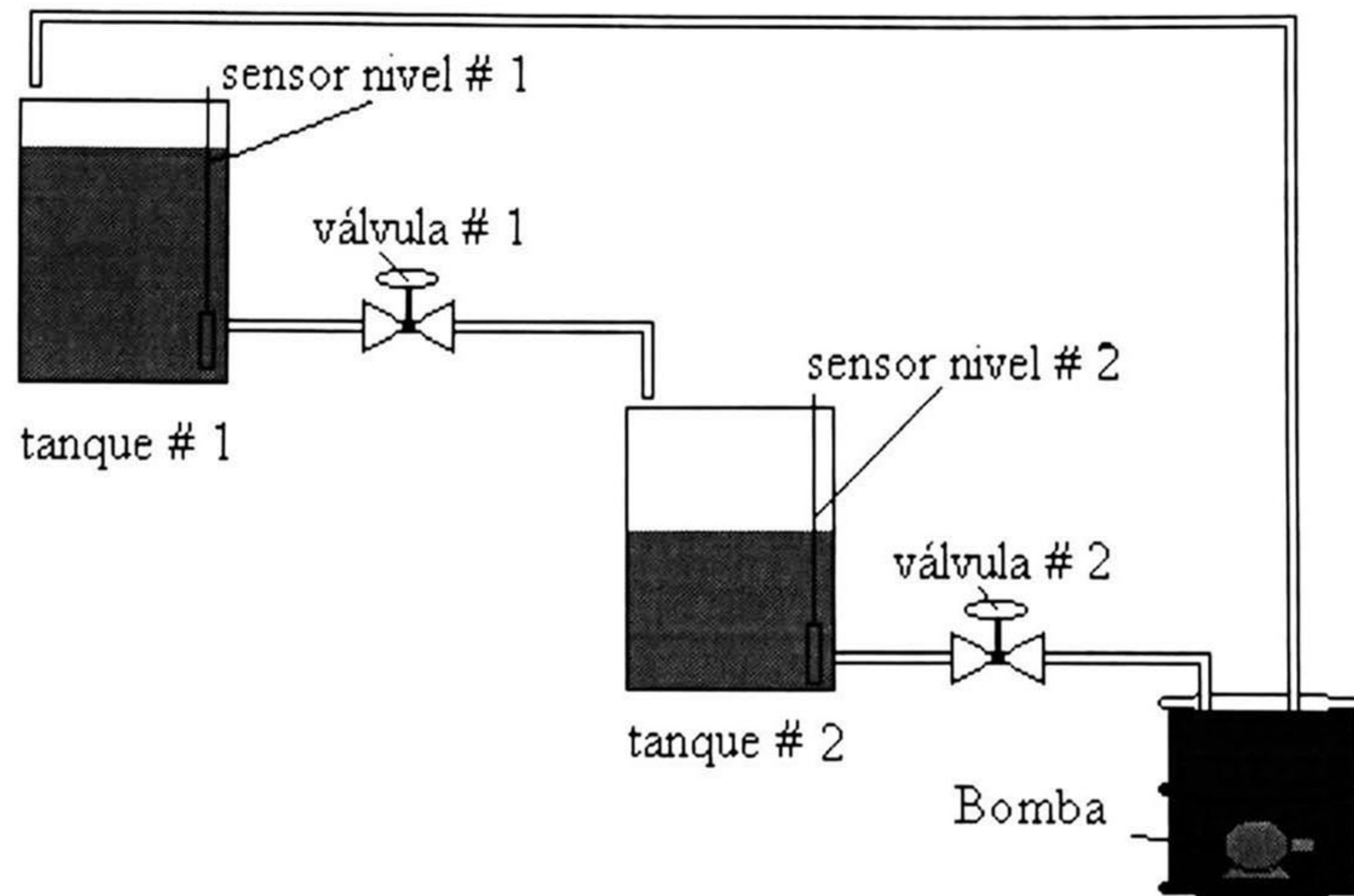


Figura 2.3: Configuración en cascada

2.2 Adquisición y Procesamiento de Datos

La etapa de adquisición de datos y señales de control se lleva a cabo a través de dos tarjetas: una tarjeta de 8-bits residente en una computadora personal y otra para conversión de señales de corriente a voltaje y viceversa, ubicada fuera de la computadora personal. La velocidad de muestreo para la tarjeta de adquisición es de 0.2 segundos.

La tarjeta de adquisición de datos comprende convertidores de señales analógicas a digitales "A/D", y convertidores de señales digitales a analógicas "D/A", además de elementos de protección para el equipo de computo.

Para procesar la información, se desarrolló un *Software* para controlar el sistema, utilizando: lenguaje de programación *Visual C++* y técnicas para desarrollar controladores en *tiempo real*, esto es, utilizando interrupciones en el procesador de la *PC*. Este software realiza el monitoreo de las variable de control (niveles) del sistema y las presenta gráficamente en forma amigable hacia el usuario, procesa la información obtenida y calcula las señales de control que serán enviadas a los actuadores (válvulas).

Finalmente, cabe mencionar que para minimizar costos y para los propósitos de este proyecto de tesis, las tarjetas de adquisición y conversión de datos han sido diseñadas en el CINVESTAV-Guadalajara. Para el lector, que requiera información más detallada sobre las tarjetas y el *Software* puede consultar [7].

Capítulo 3

Modelo Dinámico del Sistema Hidráulico

En este capítulo se desarrolla un modelo dinámico que describe el comportamiento físico del sistema. En primer lugar se obtiene un modelo para un subsistema¹ tanque-válvula, que se denominará “Modelo del subsistema tanque-válvula”, y en seguida un modelo para el sistema con los dos tanques interconectados en cascada (según se muestra en la configuración de la figura 2.3), que se denominará en lo sucesivo “Modelo de los dos tanques”

Este capítulo está estructurado como sigue: En la sección 1 se obtiene un modelo no lineal de un tanque y enseguida se procede a linealizarlo en la sección 2. En la sección 3 se obtiene un modelo entrada-salida de una válvula, mediante identificación paramétrica, este modelo es necesario para poder obtener el modelo de un subsistema tanque-válvula. En la sección 3.4.1 se obtiene el modelo matemático en variables de estado para el subsistema tanque-válvula y en la 3.4.2 el modelo en variables de estado para el sistema de los dos tanques interconectados.

¹Cada subsistema esta conformado por un tanque y una válvula de descarga conectada a éste.

3.1 Modelo Dinámico No Lineal

3.1.1 Masa Total Dentro del Tanque

La masa total dentro del tanque es

$$\text{Masa total} = \rho V = \rho A_t h \quad (3.1)$$

donde ρ es la densidad del líquido, V es el volumen del líquido, A_t es el área transversal del tanque y h la altura del nivel de líquido en el tanque.

3.1.2 Balance Total de Masa en un Tanque

En una unidad de tiempo

$$\left[\begin{array}{c} \text{Acumulación total} \\ \text{de masa} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Entrada total} \\ \text{de masa} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Salida total} \\ \text{de masa} \end{array} \right]$$

o

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \rho F_i - \rho F_o$$

si $V = A_t h$ entonces:

$$\frac{d(\rho A_t h)}{dt} = \rho F_i - \rho F_o \quad (3.2)$$

donde F_i y F_o son los flujos volumétricos de entrada y salida respectivamente, i.e. volumen por unidad de tiempo ($l/seg.$ o $dm^3/seg.$). Supongamos que la densidad del líquido y el área transversal del tanque son constantes, de la ecuación (3.2) tenemos

$$A_t \frac{dh}{dt} = F_i - F_o \quad (3.3)$$

3.1.3 Balance de Energía

Una vez obtenido el modelo que describe el comportamiento dinámico dentro de un tanque, para la configuración hidráulica usada, el flujo de salida está dado por la *Primera* ley de la *Termodinámica “Energía”* o ecuación de *Bernoulli*² [9], esto es,

$$F_o(t) = C_v \sqrt{h(t)} \quad (3.4)$$

donde C_v es la capacidad de flujo de la válvula. Sustituyendo (3.4) en (3.3), se tiene la ecuación que describe la dinámica de la altura en un tanque

$$A_t \frac{dh(t)}{dt} + C_v \sqrt{h(t)} = F_i$$

despejando

$$\frac{dh(t)}{dt} = -\frac{1}{A_t} C_v \sqrt{h(t)} + \frac{1}{A_t} F_i \quad (3.5)$$

como puede observarse se tiene una ecuación diferencial ordinaria no lineal en el estado h .

3.2 Linealización del Modelo Dinámico

Para obtener un modelo lineal del estado h , se hace uso de la primera aproximación de una expansión en series de *Taylor*, sobre la ecuación (3.5), alrededor del punto de operación. De lo anterior se obtiene

$$C_v \sqrt{h} \approx C_v \sqrt{h_o} + \frac{C_v}{2\sqrt{h_o}} (h - h_o) \quad (3.6)$$

donde h_o es la altura en estado estable. De substituir (3.6) en (3.5) se tiene

$$\frac{dh(t)}{dt} \approx -\frac{1}{A_t} \frac{C_v}{2\sqrt{h_o}} (h - h_o) - \frac{1}{A_t} C_v \sqrt{h_o} + \frac{1}{A_t} F_i \quad (3.7)$$

de esta forma se obtiene un modelo lineal aproximado de la dinámica del nivel del subsistema tanque-válvula. Sin embargo en este modelo no aparece explícitamente la variable de control, que es la corriente de entrada a la

²El desarrollo de esta ecuación se presenta en el *Apéndice A* de esta tesis.

válvula, ya que la corriente esta implícita en C_v (i.e. C_v es una función de la corriente). De acuerdo a lo anterior el modelo 3.7 para fines de control, debe ser

$$\frac{dh(t)}{dt} \approx -\frac{1}{A_t} \frac{C_v(i)}{2\sqrt{h_o}} (h - h_o) - \frac{1}{A_t} C_v(i) \sqrt{h_o} + \frac{1}{A_t} F_i \quad (3.8)$$

donde la función $C_v(i)$ debe ser identificada de alguna manera y esto sera sujeto de estudio en el trabajo de tesis [5]. Otra alternativa de encontrar un modelo para el subsistema tanque-válvula es el de encontrar un modelo, vía identificación, que relacione el flujo de salida de la válvula con la corriente que se le aplica y combinarla con la ecuación de balace de masa. Este segundo camino será el adoptado en la presente tesis.

3.3 Modelo Dinámico de la Válvula

A continuación se utiliza un método de identificación paramétrica [14] para la obtención de un modelo entrada-salida que describa el comportamiento de una de las válvulas utilizadas. El método usado se describe con mayor detalle en el *Apéndice B*. De este experimento se obtiene una respuesta del *flujo de salida de la válvula vs tiempo*, la cual es mostrada en la figura 3.2. En la figura 3.1 se muestra la configuración del subsistema tanque-válvula y el equipo de medición de flujo³, utilizados para realizar la identificación paramétrica de la válvula.

De la gráfica 3.2 se obtiene la siguiente función de transferencia

$$\frac{F_o(s)}{i(s)} = \frac{e^{-ds}}{Ts + 1}$$

donde

$$d = 4 \text{ seg}, \quad T = 6 \text{ seg} \quad (3.9)$$

cuya realización en variables de estado es

$$\dot{F}_o(t) = -\frac{F_o(t)}{T} + \frac{i(t-d)}{T} \quad (3.10)$$

donde F_o es el flujo de salida del tanque y de entrada a la válvula en el punto de operación e i es la corriente aplicada a la válvula, la cual presenta un retardo de 4 segundos.

³Las marcas, modelos y características de los equipos utilizados para realizar la identificación se presentan en el *Apéndice B*

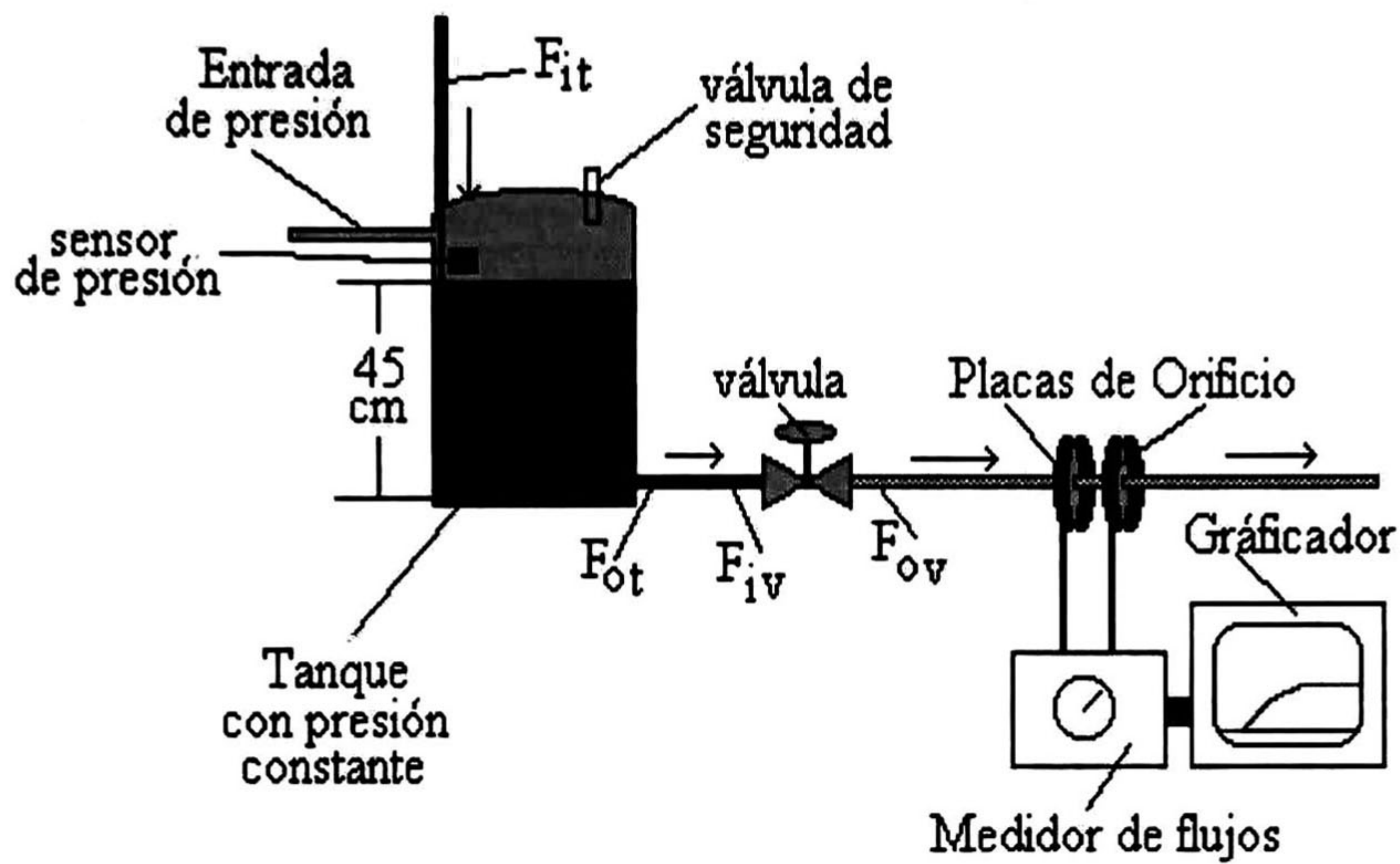


Figura 3.1: Configuración del subsistema y el equipo de medición utilizados en la identificación paramétrica

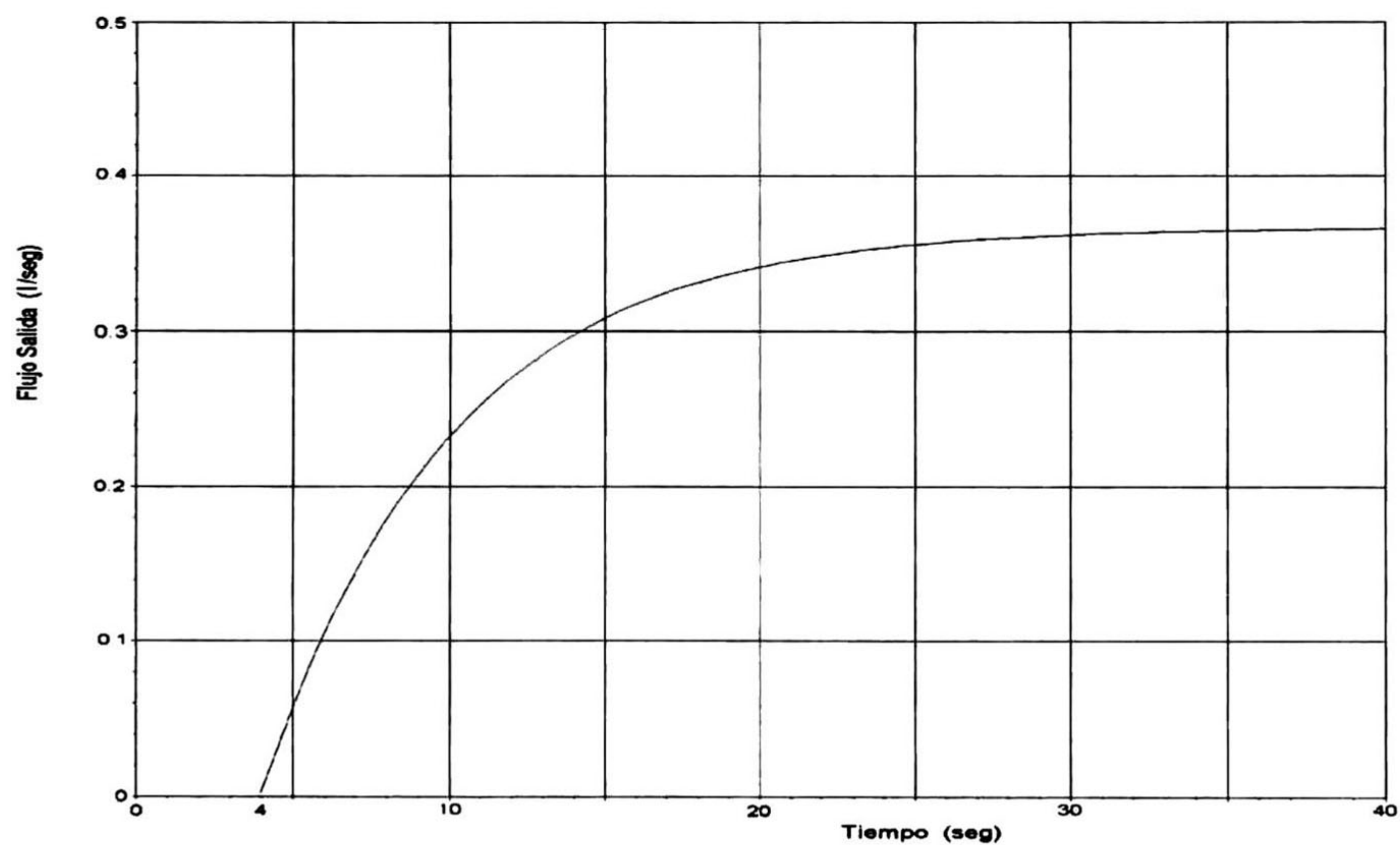


Figura 3.2: Respuesta del flujo de salida de la válvula vs tiempo

3.4 Modelos en Variables de Estado

En esta sección se obtienen los modelos en variables de estado de un subsistema tanque-válvula y de los dos tanques interconectados

3.4.1 Subsistema Tanque-Válvula

En esta subsección se obtendrá un modelo en variables de estado para uno de los subsistemas tanque-válvula.

Representando las ecuaciones de Balance de masa

$$A_t \frac{dh}{dt} = F_i - F_o$$

y de la válvula

$$\dot{F}_o(t) = -\frac{F_o(t)}{T} + \frac{i(t-d)}{T}$$

en forma matricial se tiene

$$\begin{bmatrix} \dot{h} \\ \dot{F}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{A_t} \\ 0 & -\frac{1}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ F_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{T} \end{bmatrix} i(t-d) + \begin{bmatrix} \frac{1}{A_t} \\ 0 \end{bmatrix} F_i \quad (3.11)$$

puesto que la salida y es la altura

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ F_o \end{bmatrix}$$

Debido a que el retardo de válvula es mucho menor que la constante de tiempo dominante del subsistema (La cual es infinita ya que la dinámica en 3.11 tiene un valor propio en cero) para este caso en particular, éste será despreciado. Finalmente, el modelo en variables de estado que aproxima el comportamiento de un subsistema tanque-válvula está dado por

$$\begin{bmatrix} \dot{h} \\ \dot{F}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{A_t} \\ 0 & -\frac{1}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ F_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{T} \end{bmatrix} i(t) + \begin{bmatrix} \frac{1}{A_t} \\ 0 \end{bmatrix} F_i \quad (3.12)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ F_o \end{bmatrix}$$

Para nuestro sistema tanque-válvula en particular, el valor de la área transversal es $A_t = 16 \text{ dm}^2$.

Adoptando la nomenclatura usual en la literatura, se definen:

$$\dot{x}_s = \begin{bmatrix} \dot{h} \\ \dot{F}_o \end{bmatrix}$$

$$A_s = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{A_t} \\ 0 & -\frac{1}{T} \end{bmatrix}; \quad B_s = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{T} \end{bmatrix}; \quad P_s = \begin{bmatrix} \frac{1}{A_t} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C_s = [1 \ 0] \quad (3.13)$$

$$u(t) = i(t); \quad d(t) = F_i(t)$$

se tiene

$$\begin{aligned} \dot{x}_s(t) &= A_s x(t) + B_s u(t) + P_s d(t) \\ y(t) &= C_s x(t) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Al modelo (3.12) o su equivalente (3.14) se le denominara en lo sucesivo "Modelo de un subsistema tanque-válvula".

3.4.2 Sistema de los Dos Tanques

A continuación, se obtiene el modelo en variables de estado para el sistema con los dos tanques interconectados de acuerdo a la figura 2.3, . Retomando el modelo en variables de estado de cada subsistema (3.12) y tomando en cuenta que el flujo de salida F_{o1} del subsistema tanque-válvula 1 es el flujo de entrada del subsistema tanque-válvula 2, se tiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{F}_{o1} \\ \dot{h}_2 \\ \dot{F}_{o2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{At_1} & \vdots & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T} & \vdots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots \\ 0 & \frac{1}{At_2} & \vdots & 0 & -\frac{1}{At_2} \\ 0 & 0 & \vdots & 0 & -\frac{1}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ F_{o1} \\ h_2 \\ F_{o2} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ F_{o1} \\ h_2 \\ F_{o2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{T} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{A_{t1}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F_i$$

donde h_1, h_2 son los niveles, F_{o1}, F_{o2} son los flujos de salida, A_{t1}, A_{t2} son las áreas transversales, del tanque 1 y 2 respectivamente; $i_1(t)$ e $i_2(t)$ son las entradas de corriente a la válvula 1 y 2 respectivamente y F_i es el flujo de entrada al tanque 1 el cual, para nuestro sistema en particular es constante y su valor está determinado por la capacidad de la bomba del circuito de recirculación del agua. Los valores numéricos de las áreas transversales son de $A_{t1} = A_{t2} = 16 \text{ dm}^2$ y de (3.9) $T = 6$.

La ecuación (3.15) representa el modelo en variables de estado del sistema de los dos tanques interconectados en una configuración en cascada con las válvulas de control a la salida de cada tanque.

Como puede verse en (3.15) existe un acoplamiento entre el subsistema 1 y el subsistema 2, ya que el nivel del primer tanque influye directamente sobre el nivel del segundo tanque. Experimentalmente, se observó sobre el prototipo, que el efecto de este acoplamiento es pequeño, por esta razón aproximaremos el modelo del sistema con los dos tanques como dos subsistemas tanque-válvula desacoplados. Esta aproximación del sistema con dos tanques está dado por

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{F}_{o1} \\ \dot{h}_2 \\ \dot{F}_{o2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{A_{t1}} & \vdots & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{6} & \vdots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \vdots & 0 & -\frac{1}{A_{t2}} \\ 0 & 0 & \vdots & 0 & -\frac{1}{6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ F_{o1} \\ h_2 \\ F_{o2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{6} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{A_{t1}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F_i \quad (3.16)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ F_{o1} \\ h_2 \\ F_{o2} \end{bmatrix}$$

Es decir, se puede modelar el sistema con los dos tanques interconectados, como dos subsistemas tanque-válvulas independientes.

Retomando el modelo (3.15) y adoptando la nomenclatura usual en la literatura, se definen:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \\ \dot{F}_{o1} \\ \dot{F}_{o2} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{At_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{6} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{At_2} & 0 & -\frac{1}{At_2} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{6} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{6} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{6} \end{bmatrix}; \quad (3.17)$$

$$P = \begin{bmatrix} \frac{1}{At_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$u(t) = i(t); d(t) = F_i$$

con lo cual (3.15) es equivalente a

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Pd(t) \quad (3.18)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

Capítulo 4

Diseño e Implementación

4.1 Introducción

En este capítulo se da comienzo al caso de estudio: se diseña una serie de controladores para la regulación del nivel en ambos tanques del sistema hidráulico configurados en forma de cascada tal y como lo muestra la figura 2.3. Más precisamente se diseñan un controlador del tipo *Todo-nada*, dos controladores clásicos como el *Proporcional P* y el *Proporcional-Integral PI* y finalmente un controlador moderno como el *LQ* “*Linear Quadratic Regulator*”. Para cada controlador diseñado se muestran las respuestas del nivel, obtenidas en tiempo real, en cada tanque (variable a controlar) así como las respuestas de la corriente de excitación de cada válvula (señal de control), así mismo se discuten los resultados obtenidos

Para la mayoría de los diseños de los controladores se considera el sistema como dos subsistemas tanque-válvula desacoplados, esto es; basta diseñar un controlador para un subsistema tanque-válvula e implementar este controlador para cada subsistema. Esto puede ser hecho así, ya que como se mostró en el capítulo anterior, el acoplamiento existente entre cada subsistema tanque-válvula es pequeño en magnitud y puede ser despreciado.

4.1.1 Especificaciones de Diseño

Las especificaciones de diseño son:

- Flujo de entrada al primer tanque de 0.367 l/seg, i.e $F_i = 0.367$ l/seg

- Regulación del nivel en 45 cm para cada tanque
- En los controladores lineales se busca que los actuadores se saturen en un mínimo número de puntos.

4.1.2 Escenarios de Prueba de los Controladores

Para probar la regulación de cada uno de los controladores se propusieron los siguientes escenarios de prueba: En estado estacionario se introduce una perturbación instantánea consistente en una extracción de 10 litros, que es aproximadamente el 13.8% del volumen del tanque 1 en estado estable, la cual denominaremos "pt1", ésta se introduce alrededor de los primeros 30 minutos, enseguida se introduce una segunda perturbación instantánea consistente en un aumento del 13.8% del volumen en el tanque 2 en estado estable entre los 30 y 40 minutos. La duración de los experimentos se ha fijado a 40 minutos. Las condiciones iniciales en los niveles de los tanques fueron de 5 centímetros de nivel en el tanque 1 y de 3.8 centímetros para el tanque 2, debido a la ubicación física de las válvulas.

4.2 Controlador *Todo-Nada*

Los controladores tipo *Todo-Nada* son muy utilizados para controlar niveles de líquidos. La ley de control diseñada para este sistema consiste en enviar un comando en corriente de cierre total de la válvula si el nivel medido es inferior o igual al nivel de referencia y otro de apertura total de la válvula si es superior. En esta sección se diseña un controlador *Todo-Nada* para cada subsistema tanque válvula y la configuración del sistema en lazo cerrado se muestra en la figura 4.1.

Las respuestas en tiempo real obtenidas son mostradas en la figura 4.2.

Como se observa en la figura 4.2 el nivel oscila alrededor del nivel de referencia, esta variación se debe al retardo y la dinámica de la válvula, puesto que la válvula tiene que ir de totalmente abierta a totalmente cerrada como se muestra en la figura 4.3.

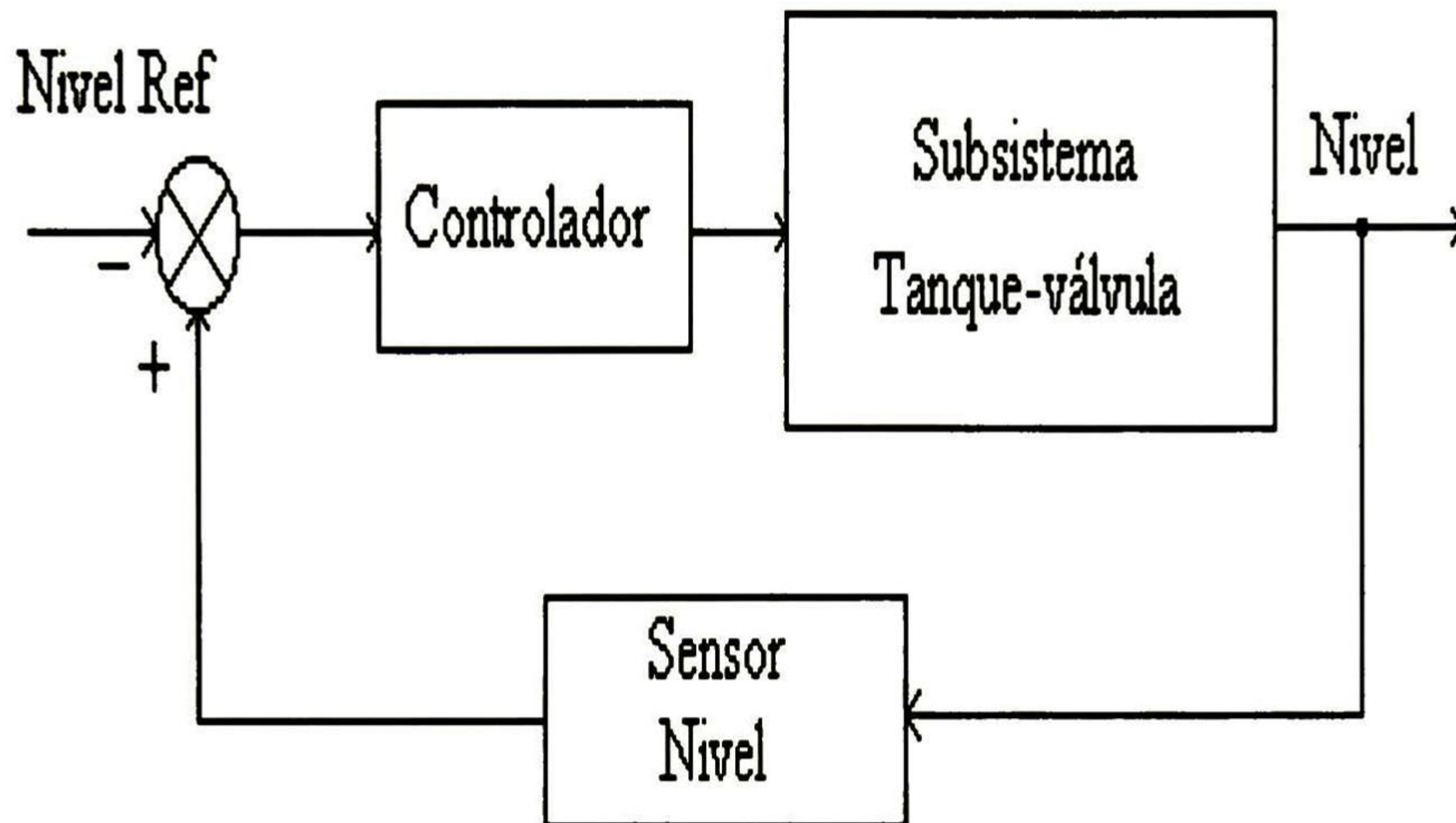


Figura 4.1: Configuración del sistema de control en lazo cerrado

En la figura 4.2 también puede observarse que una perturbación introducida sobre el tanque 1 afecta ligeramente al nivel del tanque 2, mientras que la perturbación sobre el tanque 2 no afecta el nivel del tanque 1, esto pone en evidencia el acoplamiento entre el tanque 1 sobre el tanque 2 del cual ya se había hablado anteriormente. En cuanto a los tiempos de regulación puede observarse que las perturbaciones son rechazadas en 1.8 minutos. Los tiempos en que cada tanque alcanza su estado permanente son de 6.9 minutos para el primer nivel y de 14.9 para el segundo. En lo que sigue, llamaremos a estos tiempos “tiempos de estabilización”. En la tabla 4-1 se encuentran resumidos estos tiempos.

Finalmente, del experimento anterior se puede notar que el controlador *Todo-Nada* en sistemas de tanques con válvulas electromecánicas, puede ser útil cuando la precisión sobre el nivel no sea crucial. Por otro lado el diseño y la implementación del controlador es bastante simple. No se requiere el ajuste de parámetros y ni el conocimiento de un modelo analítico en el diseño.

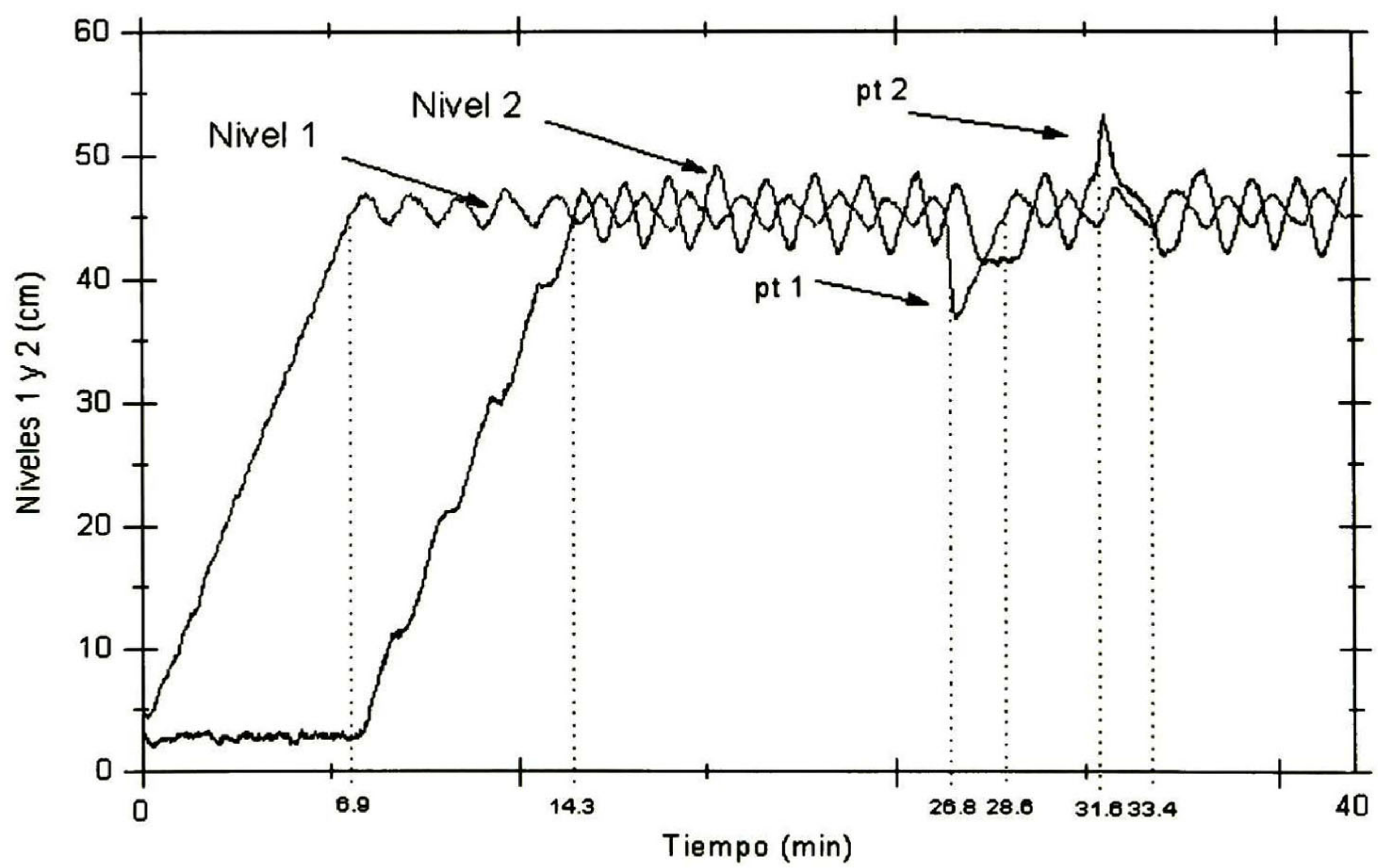


Figura 4.2: Respuestas de los niveles en tiempo real obtenidas con el controlador *Todo-Nada*

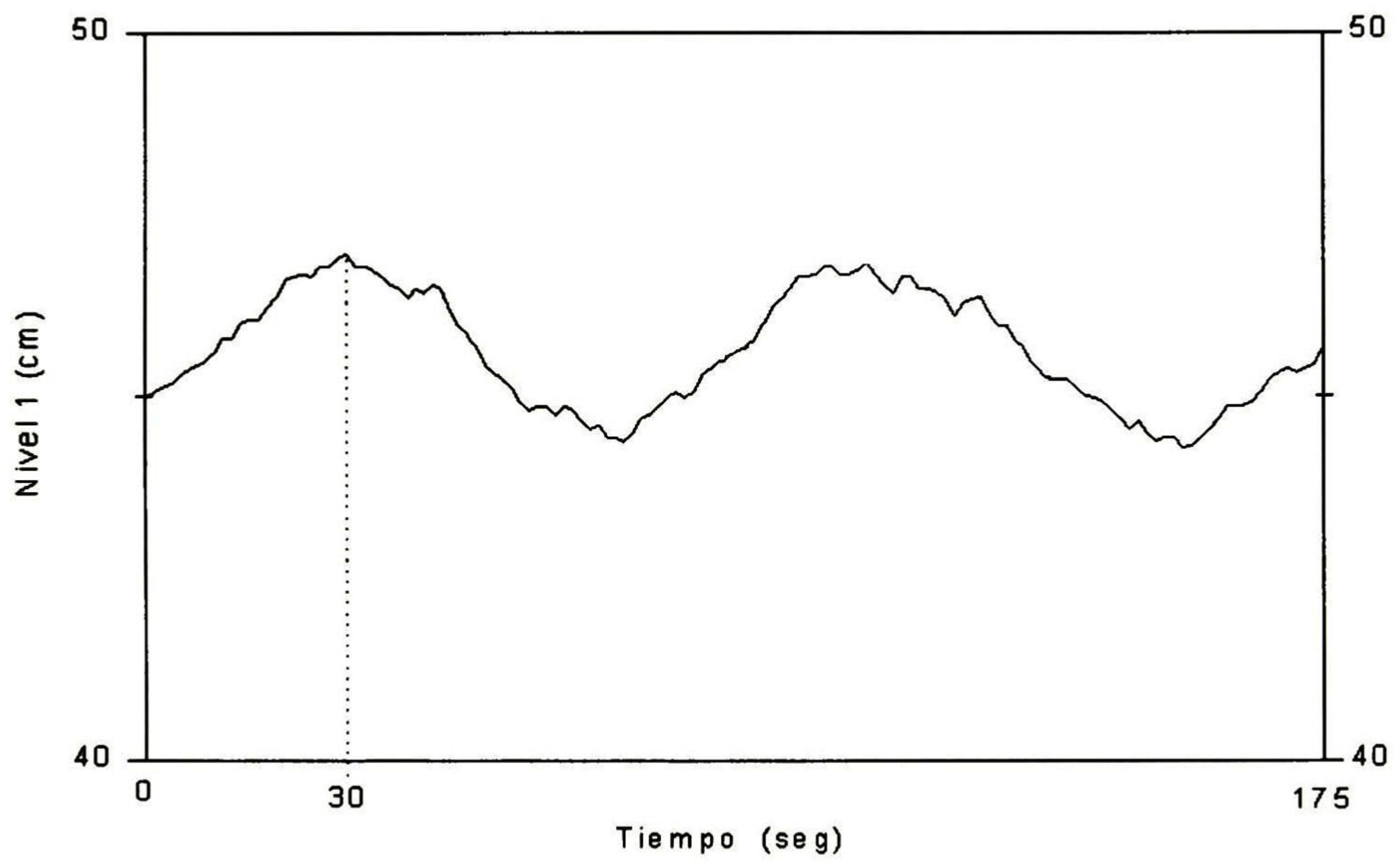


Figura 4.3: Oscilación del nivel como consecuencia del retardo y dinámica que presenta la válvula

4.3 Controlador *Proporcional P*

Los controladores tipo *P* son usados en muchos procesos industriales, debido a su fácil y rápida implementación y ajuste; esto se debe a que la señal de control es proporcional al error e [3], [6]. Para el sistema en cuestión la ley de control *P* es de la forma

$$u(t) = K_c e(t)$$

donde u es la señal de control, e es el error entre el nivel de referencia y el nivel medido en el tanque y K_c es la ganancia del controlador proporcional.

Para el controlador diseñado el valor de la ganancia K_c se eligió utilizando el método para ajuste *Ziegler-Nichols* [3], [15], El cual nos proporciono un valor de $K_c = 0.625$, este método y los resultados obtenidos se encuentra en el *Apéndice D* de esta tesis.

En la figura 4.4 se muestran las respuestas en tiempo real obtenidas para este controlador¹.

Como se aprecia en la figura 4.4 los tiempos en que cada nivel se estabiliza son 8.6 minutos para el primer nivel y de 17.8 minutos para el segundo, el acoplamiento del nivel 1 sobre el nivel 2 ésta presente. El error de regulación al aplicar la perturbación pt1 tiende a cero en un tiempo de 2.8 minutos, mientras que el rechazo de la perturbación pt2 se logra en un tiempo de 2.9 minutos. Los tiempos fueron ligeramente más grandes en comparación con los obtenidos con el controlador *Todo-Nada*, esto se debe a que la ganancia proporcional produce controles menos violentos. Se puede notar además en las figuras 4.5 y 4.6, que los actuadores se mantienen saturados en un número mínimo de puntos, satisfaciendo así una de las especificaciones señaladas al comienzo de este capítulo. Los tiempos obtenidos con este controlador se sumarizan en la tabla 4-1.

Un experimento adicional consiste en introducir una perturbación tipo escalón (que se denominará "*Pesc 1*" para el tanque 1 y "*Pesc 2*" para

¹Para evitar corriente negativas que dañen a los actuadores, se implemento en los controladores *P* y *PI* un mecanismo dentro del algoritmo que evitan estas acciones no deseadas.

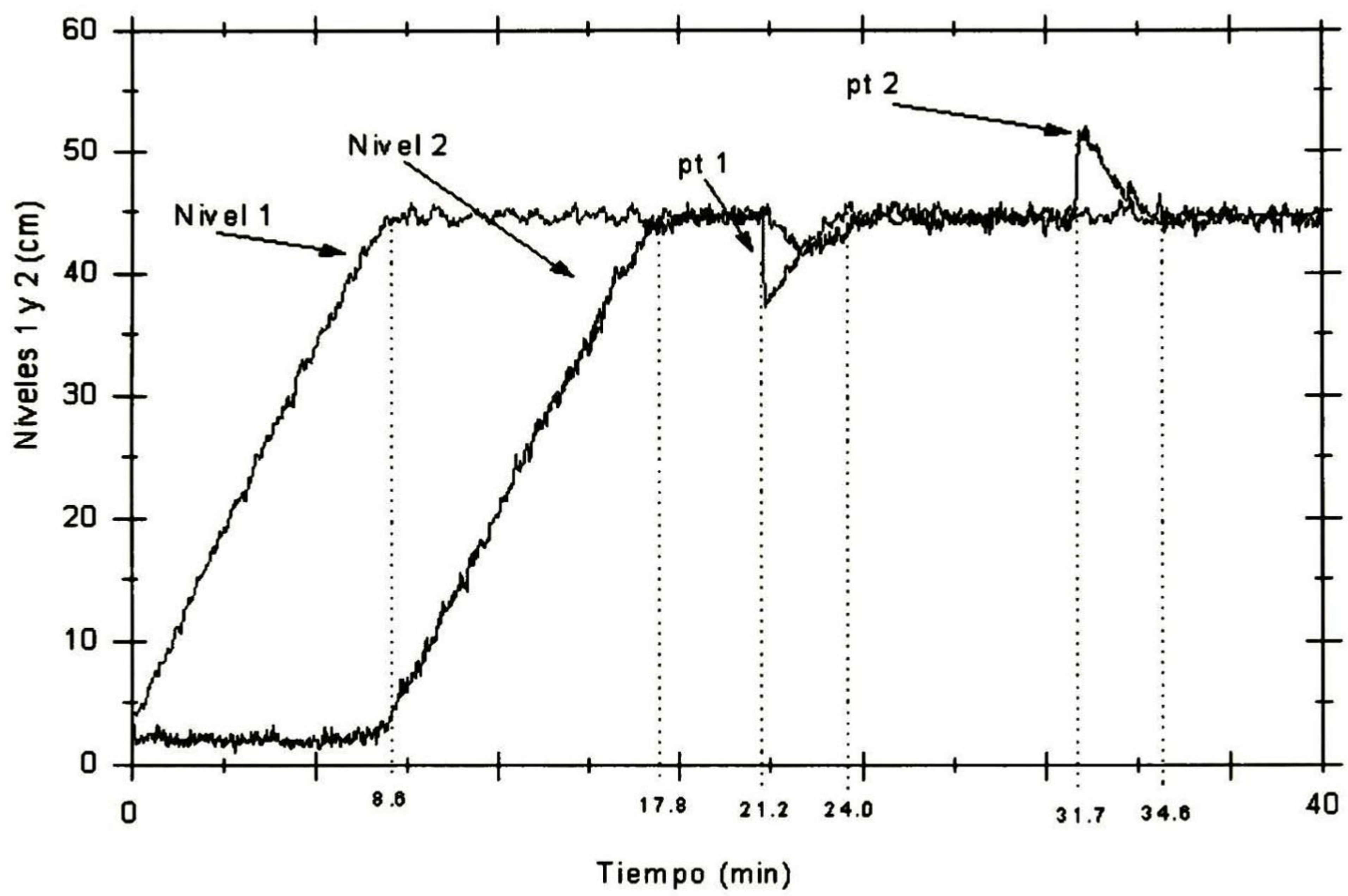


Figura 4.4: Respuestas de los niveles en tiempo real obtenidas con el controlador *P*

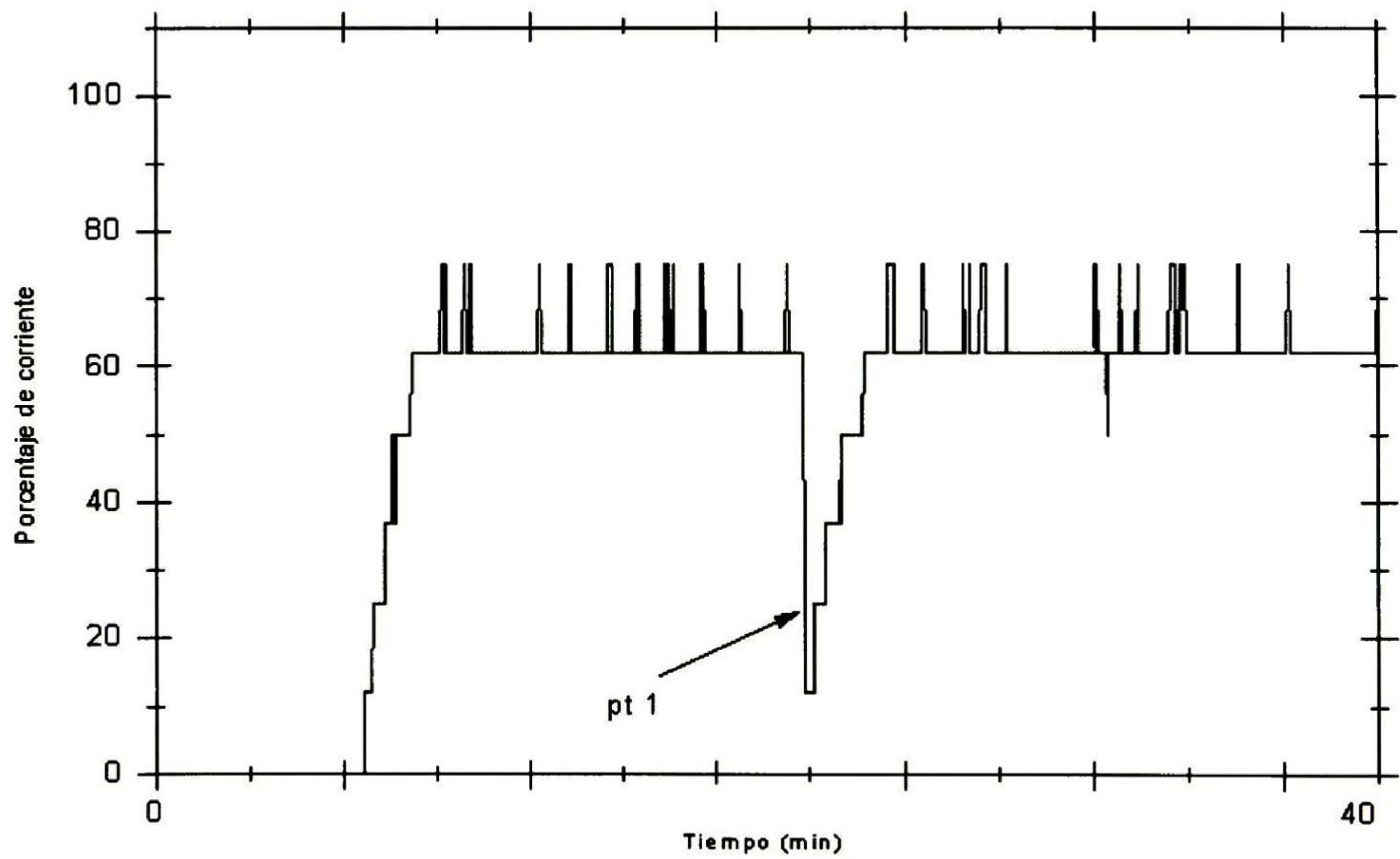


Figura 4.5: Señal de control hacia el actuador de la válvula 1

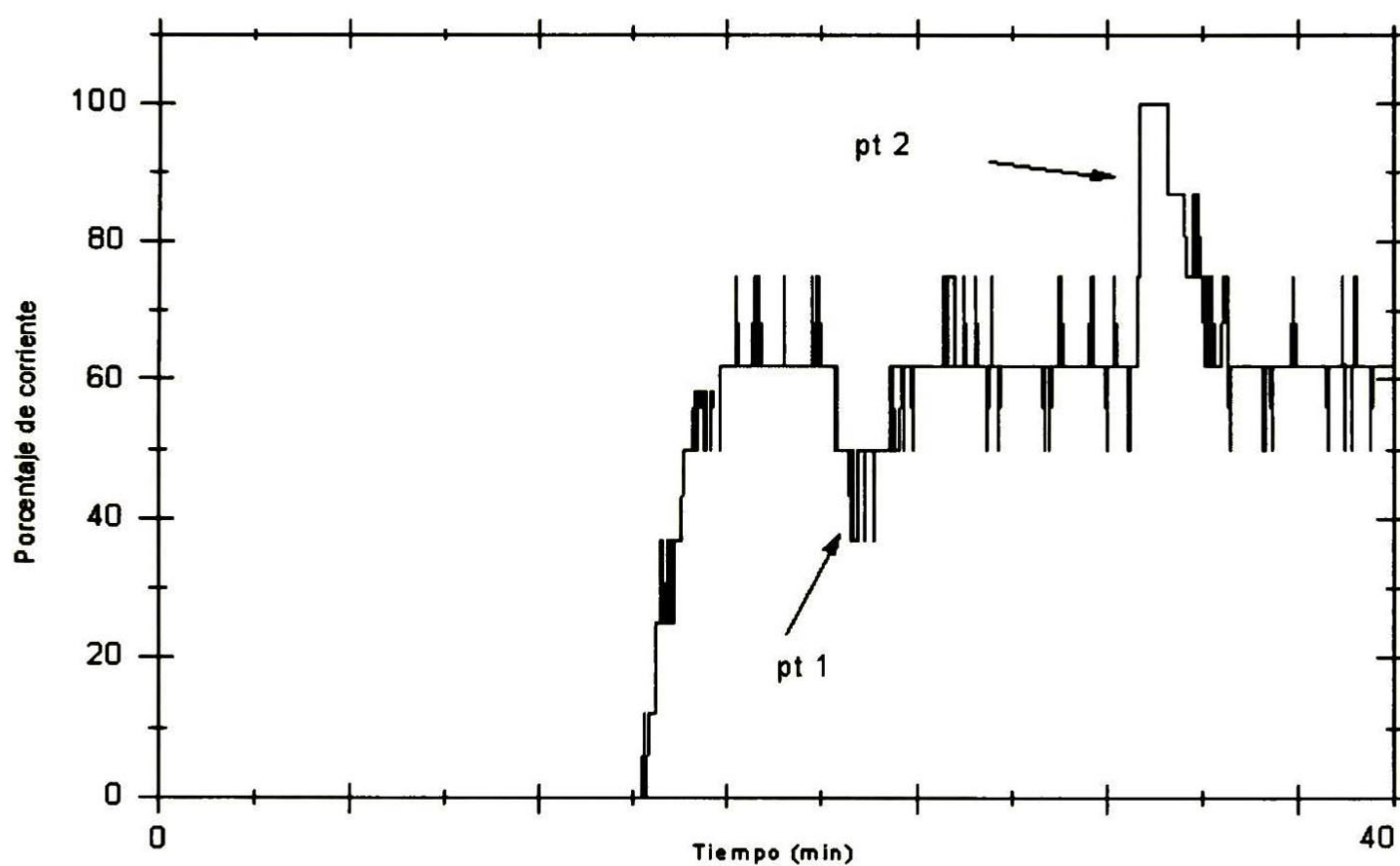


Figura 4.6: Señal de control hacia el actuador de la válvula 2

el tanque 2) sobre el flujo de entrada F_i . La respuesta de los niveles a este experimento se muestran en la figura 4.7. Como puede observarse en la figura 4.7, las perturbaciones no son rechazadas. Lo anterior se puede explicar debido al hecho que el efecto de tener una perturbación escalón sobre F_i , es equivalente al efecto de tener una perturbación d sobre la salida (altura) cuyo modelo interno está dado por (ver *Apéndice E*):

$$\frac{1}{A_s s^2}$$

ahora, de acuerdo al principio del Modelo Interno [16], para rechazar la perturbación d , se deberá tener en la transferencia en lazo abierto planta-controlador el modelo interno de ésta, lo que implica que esta transferencia deberá contener al menos dos acciones integrales, es decir ser de tipo 2. Desgraciadamente, la transferencia en lazo abierto del controlador P con la planta es de la forma

$$K_c \left[\frac{1}{A_s s (T s + 1)} \right]$$

la cual es de tipo 1 y entonces la perturbación no podrá ser rechazada por completo, y solo puede ser atenuada si se aumenta el valor de la ganancia proporcional, pero esto como se sabe, podría ocasionar que la señal de control mantenga saturado la mayor parte del tiempo a los actuadores, situación que no se desea tener.

De las gráficas obtenidas se puede apreciar que el error en estado estacionario, con respecto al nivel de referencia, es cero; se tiene una buena regulación en presencia de las perturbaciones instantáneas sobre el nivel; que perturbaciones escalón sobre el flujo de salida o de entrada no pueden ser rechazadas; para el valor elegido de la ganancia proporcional los actuadores se saturan en un número mínimo de puntos. El controlador P resulta ser adecuado, si no se presentan en el sistema perturbaciones tipo escalón sobre el flujo. Por otro lado el diseño y la implementación del controlador es bastante simple, requiriendo solo el ajuste del parámetro (K_c). El diseño de este controlador no requiere el conocimiento de un modelo analítico.

4.4 Controlador *Proporcional Integral PI*

En el diseño del controlador *PI* la señal de control es proporcional al error y a la integral del error [3], [6].

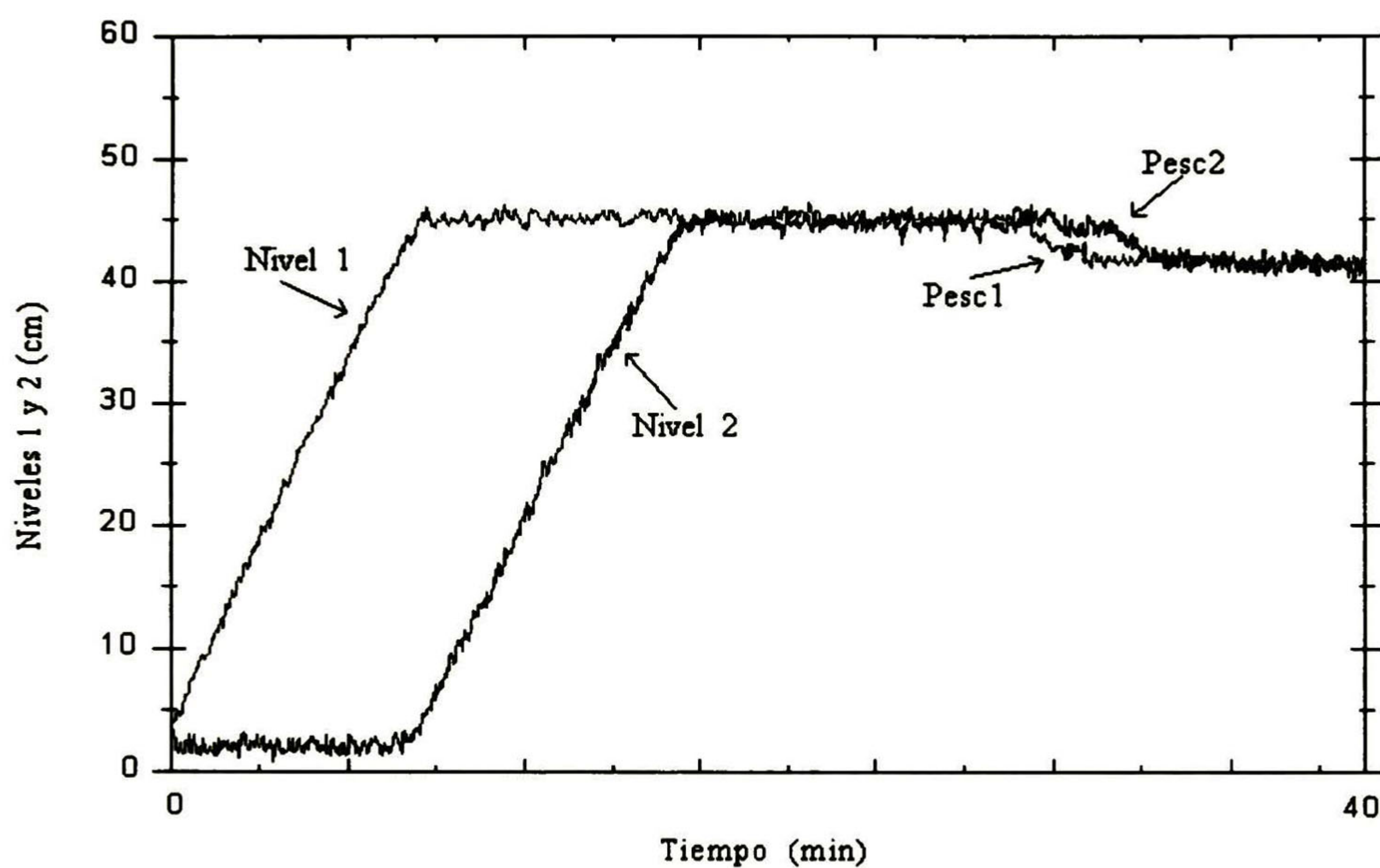


Figura 4.7: Respuestas en tiempo real de los niveles con el controlador P al aplicarle perturbaciones tipo escalón "Pesc 1" y "Pesc 2"

$$u(t) = K_c[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau]$$

El valor de la ganancia K_c y del tiempo de integración T_i son ajustados utilizando el método *Ziegler-Nichols* [3], [15]. El valor de la ganancia y del tiempo de integración obtenidos con este método son: $K_c = 0.568$ y $T_i = 9.4243$, este método y los resultados obtenidos se encuentra en el *Apéndice D* de esta tesis. En la figura 4.8 se muestran las respuestas en tiempo real obtenidas. En esta figura se puede apreciar que los niveles se estabilizan en 8.6 minutos para el primer nivel y en 17.8 minutos para el segundo, los tiempos en que las perturbaciones son rechazadas son 2.6 minutos para la perturbación pt1 y de 2.8 minutos para la perturbación pt2, estos tiempo se muestran en la tabla 4-1. Las señales de control se muestran en las figuras 4.9 y 4.10. De la misma forma que en el controlador tipo P , las señales de control saturan en un mínimo número de puntos a los actuadores.

En la figura 4.11 se muestran las respuestas en tiempo real de los niveles, cuando se introducen perturbaciones tipo escalón “*Pesc1*” y “*Pesc 2*” sobre los flujos de entrada del tanque 1 y tanque 2 respectivamente. En estas curvas puede observarse que ambas perturbaciones son rechazadas, esto se debe (siguiendo la discusión de la subsección anterior), a que la transferencia planta-controlador PI es de tipo dos.

De las gráfica obtenidas podemos apreciar que: el error en estado estacionario, con respecto al nivel de referencia, es cero; se tiene una buena regulación ante la presencia de perturbaciones instantáneas sobre el flujo; se tiene una buena regulación ante la presencia de perturbaciones escalón sobre el flujo de salida, los actuadores se saturan en un mínimo número de puntos. Todo lo anterior indica que, para los escenarios mostrados, el control PI es una buena alternativa de control. Por otro lado el diseño del controlador requiere el ajuste de los parámetros K_c y T_i , pero no requiere el conocimiento de un modelo analítico.

4.5 Controlador LQ

En esta sección se diseña un controlador LQ para el sistema en cuestión. Debido a que el diseño de este tipo de controladores se basan en un modelo

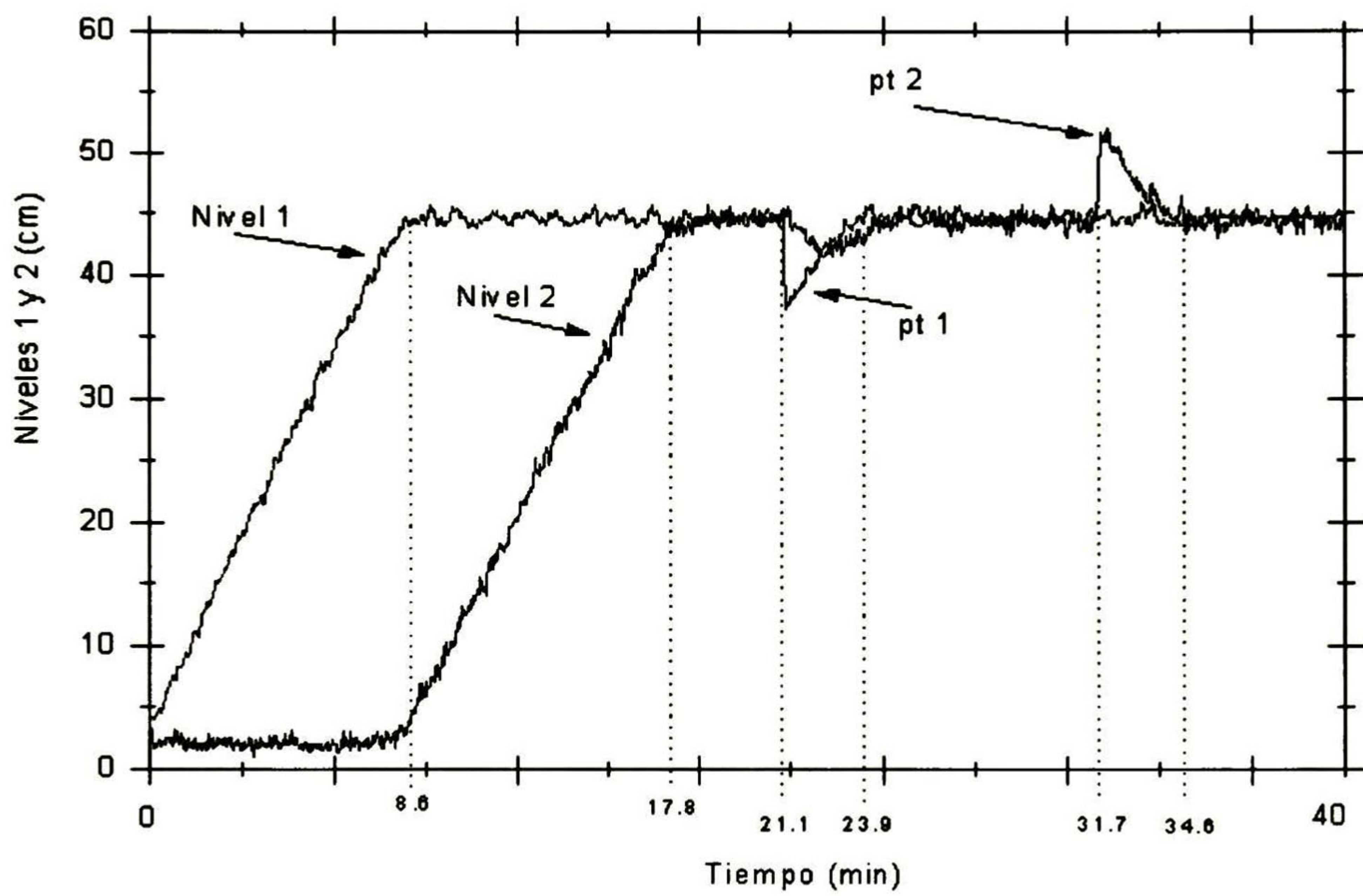


Figura 4.8: Respuestas en tiempo real de los niveles obtenidas con el controlador *PI*

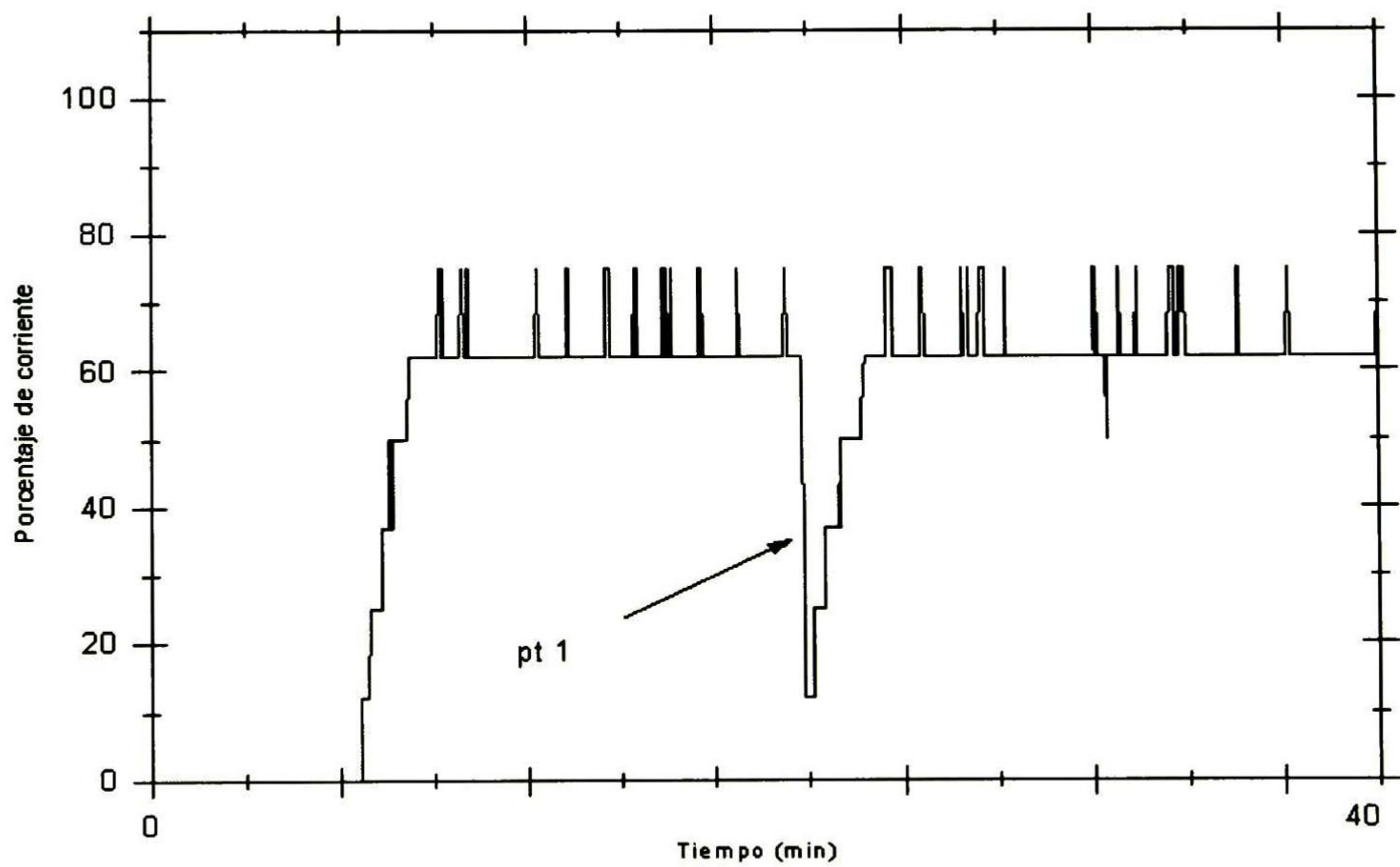


Figura 4.9: Señal de control hacia el actuador de la válvula 1

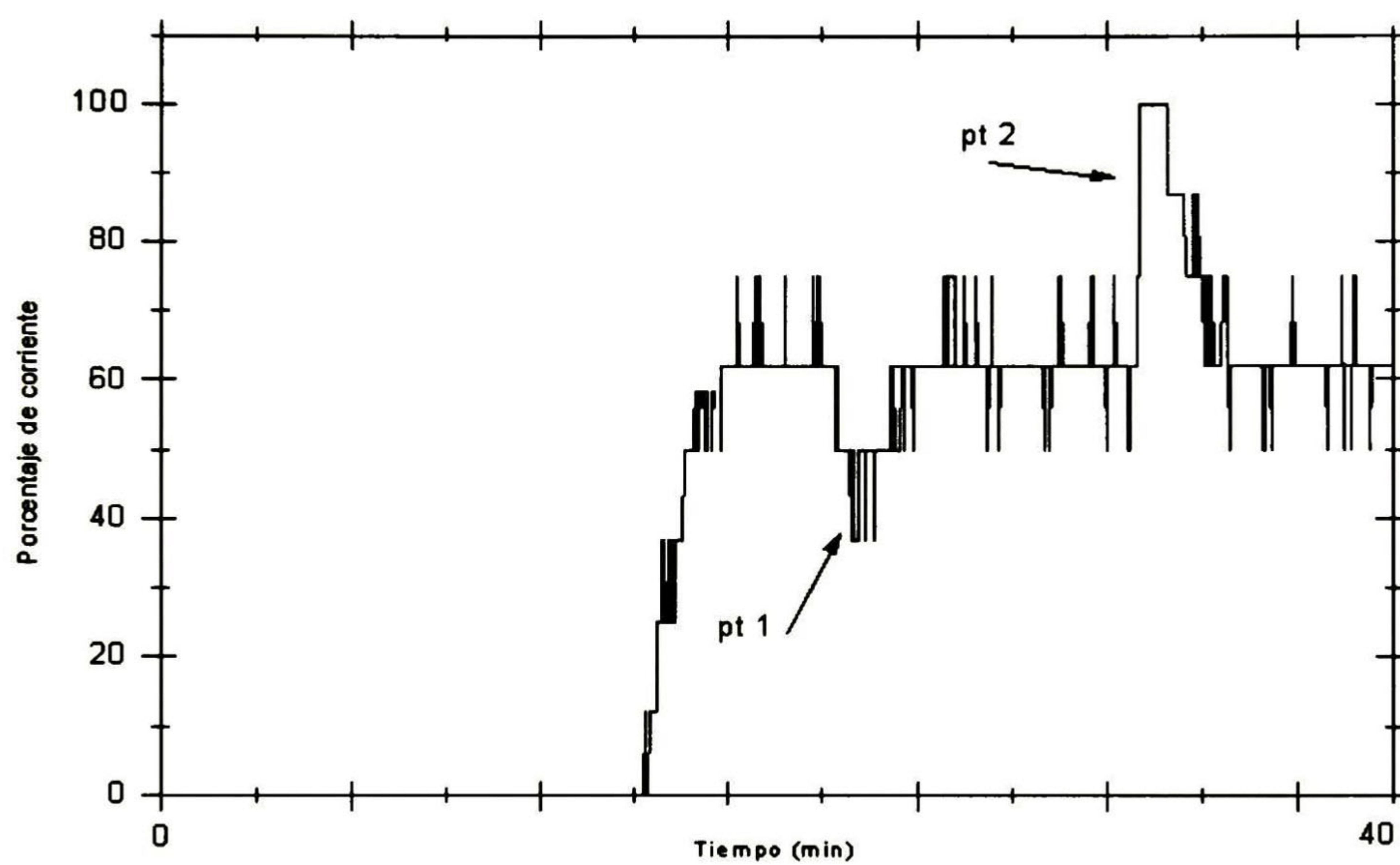


Figura 4.10: Señal de control hacia el actuador de la válvula 2

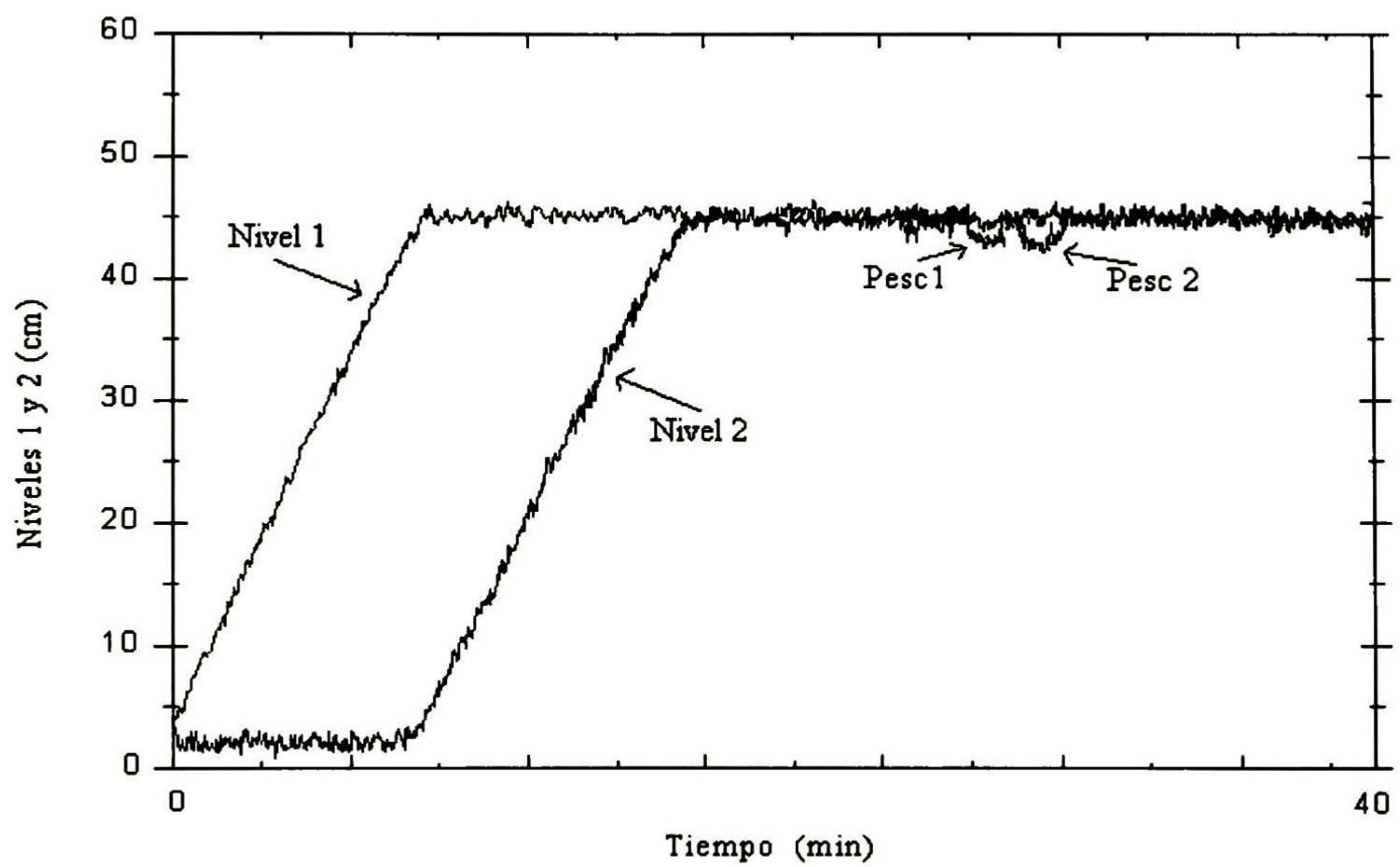


Figura 4.11: Respuestas en tiempo real de los niveles con el controlador *PI* al aplicarle perturbaciones tipo escalón “*Pesc 1*” y “*Pesc 2*”

del sistema en variables de estado [2], [11], se retoman los modelos (3.12) y (3.16) derivados en el capítulo anterior. Primeramente, en la subsección 4.5.2 se diseña un control LQ para el modelo (3.12), el cual es equivalente a tener dos modelos de un subsistema tanque-válvula independientes. En base a esto, bastará con diseñar un LQ *monovariante* para un subsistema tanque-válvula e implementar uno de estos LQ para cada subsistema. Para este diseño se mostrarán las respuestas en tiempo real del sistema en lazo cerrado. En seguida en la subsección 4.5.3, el diseño del LQ se basa en el modelo (3.15). En este caso el LQ se diseña realmente para el sistema *multivariante* con entradas de control $i_1(t)$ e $i_2(t)$ y salidas $h_1(t)$ y $h_2(t)$, donde el acoplamiento entre subsistema no es despreciado. Las respuestas en tiempo real serán mostradas y discutidas.

4.5.1 Preliminares Sobre el Control LQ [2], [11]

Sea un sistema lineal invariante en el tiempo

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

y sea el criterio

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt \quad (4.1)$$

donde $Q = Q^T \geq 0$ es la matriz de ponderación sobre el estado y $R = R^T > 0$ es la matriz de ponderación de la señal de control. Suponiendo que el par $[A, B]$ es estabilizable y el par $[A, Q]$ es detectable, entonces la señal de control que minimiza el criterio J y estabiliza el sistema en lazo cerrado es

$$u(t) = -K_{LQ} x(t) \quad (4.2)$$

donde

$$K_{LQ} = R^{-1}B^T P \quad (4.3)$$

es la ganancia LQ y P es la única solución no negativa que satisface la siguiente ecuación de *Riccati*:

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (4.4)$$

4.5.2 Controlador LQ para un Subsistema Tanque-Válvula

En esta subsección se diseña un control LQ para el modelo (3.16), el cual es equivalente a tener dos modelos de un subsistema tanque-válvula desacoplados. En base a esto, se diseña un control LQ *monovariante* para un subsistema tanque-válvula y se implementa uno de estos controladores LQ para cada subsistema.

Para el diseño del control LQ , que en este caso se denominará “ LQ -*monovariante*”, se retoma el modelo de un subsistema tanque-válvula (3.14) donde las matrices A_s y B_s están dadas en (3.13).

Para emplear el algoritmo LQ dado en la subsección precedente, es necesario proponer, primeramente, las matrices de ponderación Q y R . Para esto, de las propiedades asintóticas del LQ [2], [10], se tiene que si

$$\|Q\| \gg \|R\|$$

la ganancia LQ es muy grande. Esto puede conducir a controles que saturan la mayor parte del tiempo a los actuadores, caso que no se desea. Por otro lado si

$$\|Q\| \ll \|R\|$$

entonces los polos en lazo cerrado tienden a los polos estables y a los polos estabilizados² del sistema. Como existe un polo del sistema en el origen, ver (3.14), esta dinámica puede ocasionar que la regulación sea demasiado lenta, caso que tampoco se desea. Lo anterior implica que estos dos casos extremos deben evitarse, por lo que una elección factible de las ponderaciones Q y R es aquella donde las normas de Q y R sean comparables. Un par de valores que satisface el anterior requerimiento y experimentalmente proporcionaron buenos desempeños son

$$Q = \begin{bmatrix} 1.5 & 0 \\ 0 & 1.5 \end{bmatrix}; \quad R = 1$$

El algoritmo LQ , con estos valores de ponderación y las matrices A_s y B_s , arrojó como valor de la ganancia LQ “ K_{LQ} ”

²En esta tesis se define un polo estabilizado como un polo estable consecuencia de reflejar un polo inestable a través del eje imaginario.

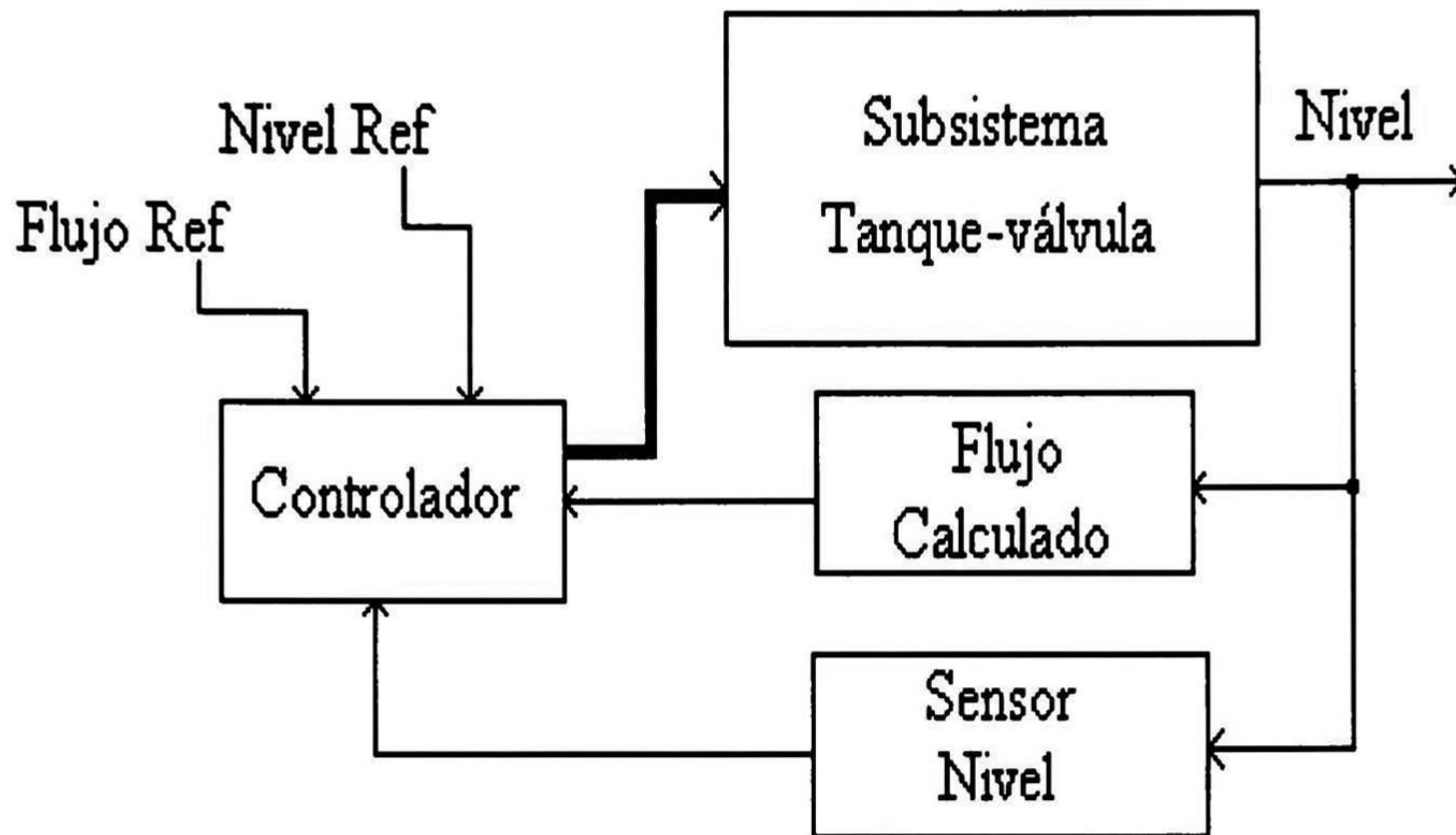


Figura 4.12: Configuración de Control en Lazo Cerrado

$$K_{LQ} = [-1.2247 \quad 0.8490]$$

La configuración de control utilizada para el controlador LQ se muestra en la figura 4.12

A continuación, en la figura 4.13 se muestra la respuesta en simulación obtenida con el sistema de control LQ sobre cada modelo lineal de los subsistemas tanque-válvula. Esta gráfica es incluida con la finalidad de poder ser comparada con las respuestas en tiempo real obtenidas con el sistema de control LQ sobre cada subsistema tanque-válvula, las cuales son mostradas en la figura 4.14.

Como se aprecia en la figura 4.13 y 4.14, las respuestas son muy similares, lo cual valida el modelo obtenido. De la figura 4.14 se puede notar que el tiempo de regulación de la perturbación pt1 sobre el tanque 1 es de 2.0 minutos y para la perturbación pt2 es de 2.1 minutos. Los tiempos para la estabilización de los niveles son de 8.6 para el primer nivel y de 17.8 para el

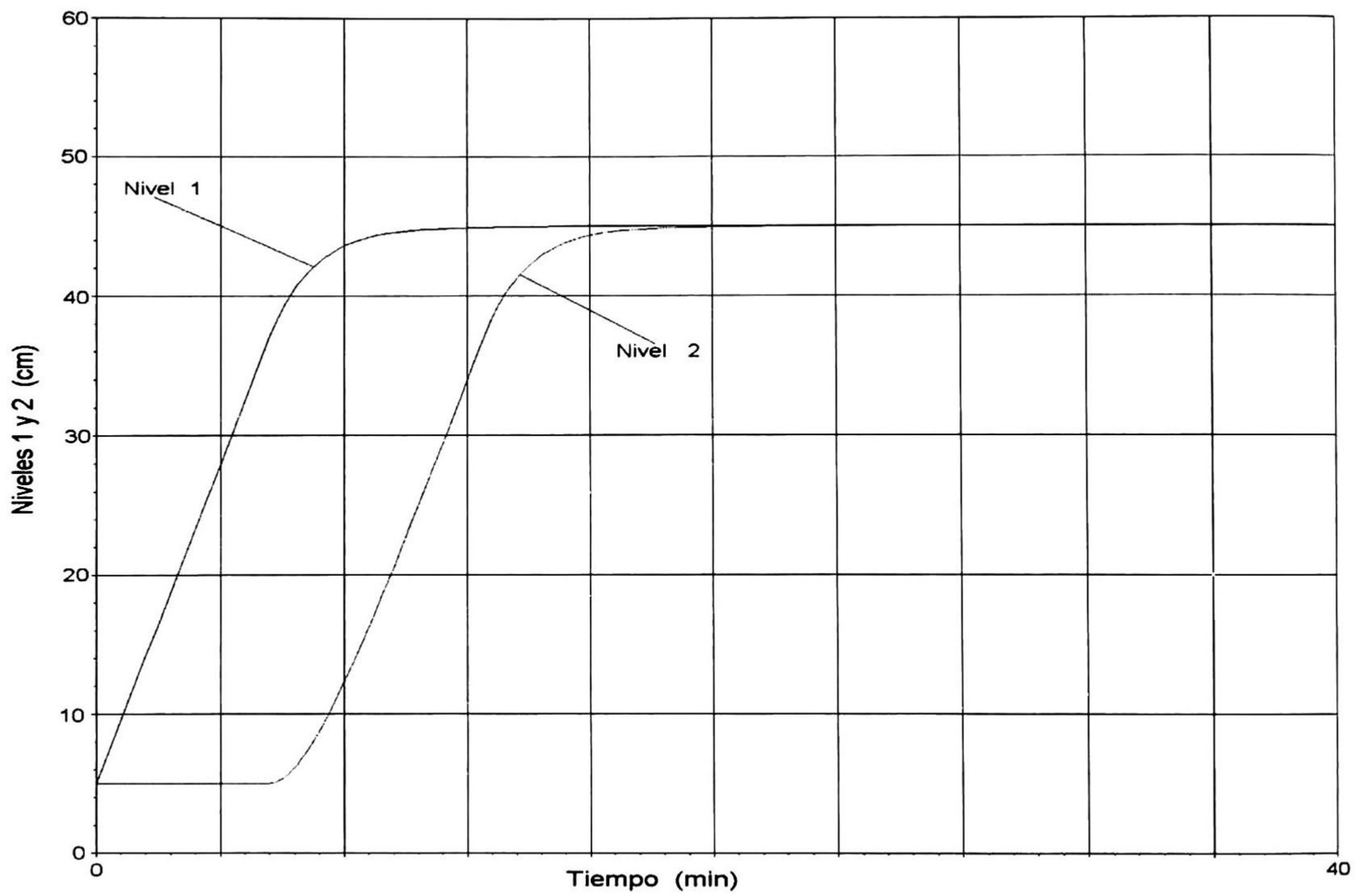


Figura 4.13: Respuestas de los niveles en la simulación con controladores LQ

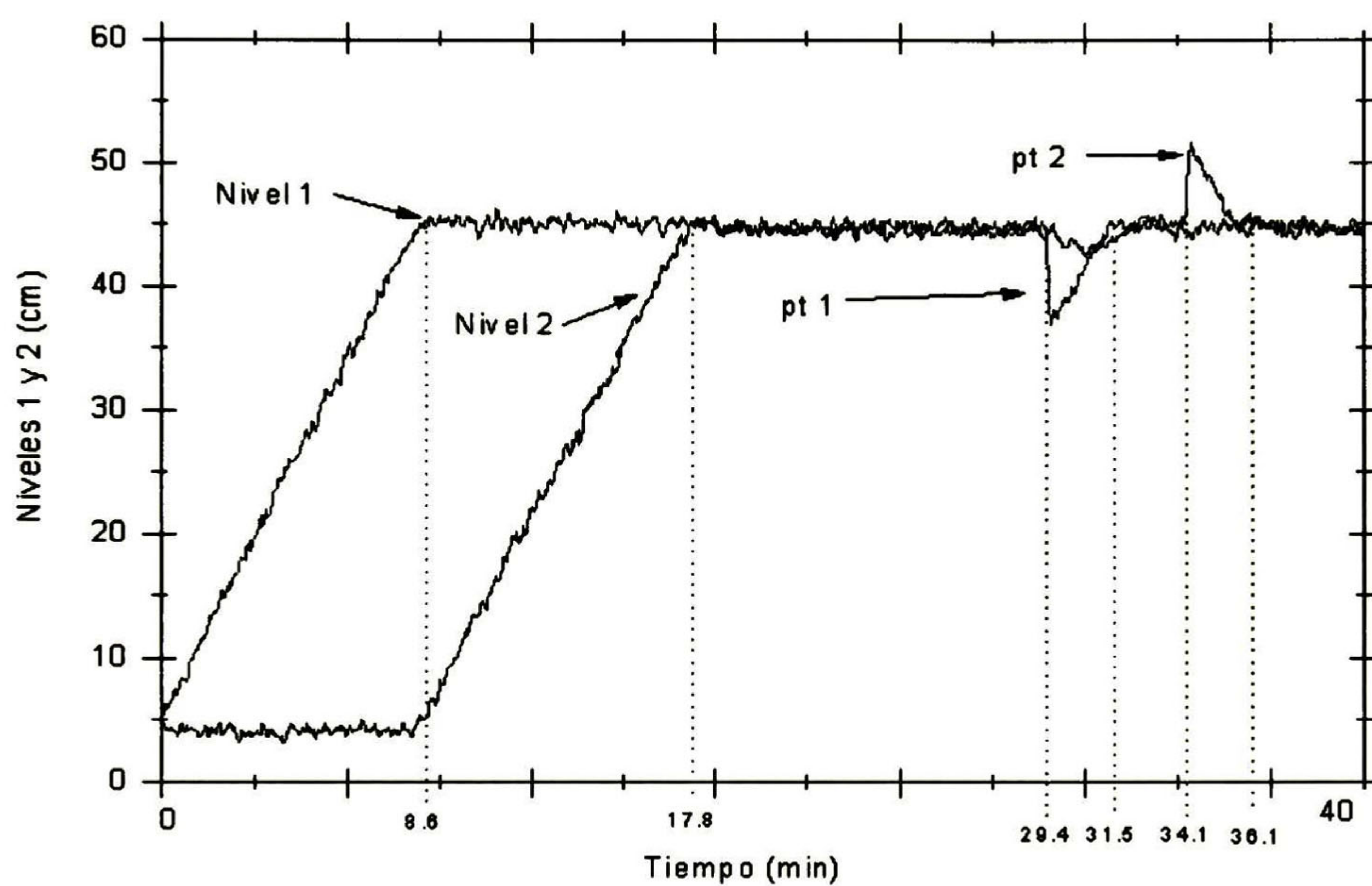


Figura 4.14: Respuestas en tiempo real de los niveles obtenidas del controlador LQ

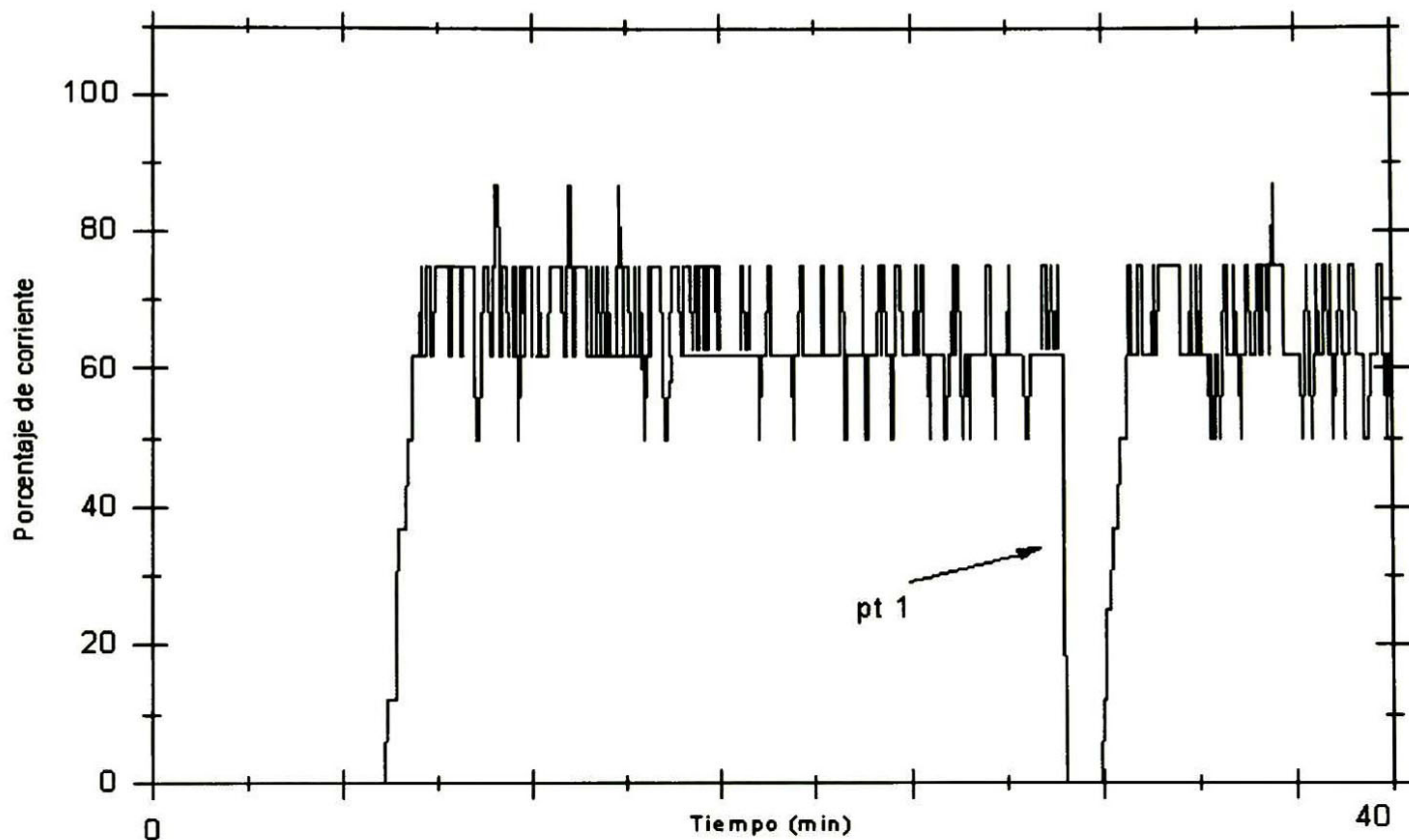


Figura 4.15: Señal de control hacia el actuador de la válvula 1

segundo. Estos tiempos son resumizados en la tabla 4-1. En las figuras 4.15 y 4.16 se muestran las señales de control de este controlador.

De igual forma que en los controladores anteriores, a este controlador se les aplican perturbaciones tipo escalón sobre el flujo de entrada F_i en ambos tanques. En la figura 4.17 se muestran las respuestas de los niveles en tiempo real y como se observa no son rechazadas.

Finalmente, el error en estado estacionario, con respecto al nivel de referencia, es cero; se tiene una buena regulación en presencia de las perturbaciones instantáneas sobre el flujo, pero un mal rechazo a perturbaciones escalón sobre el flujo.

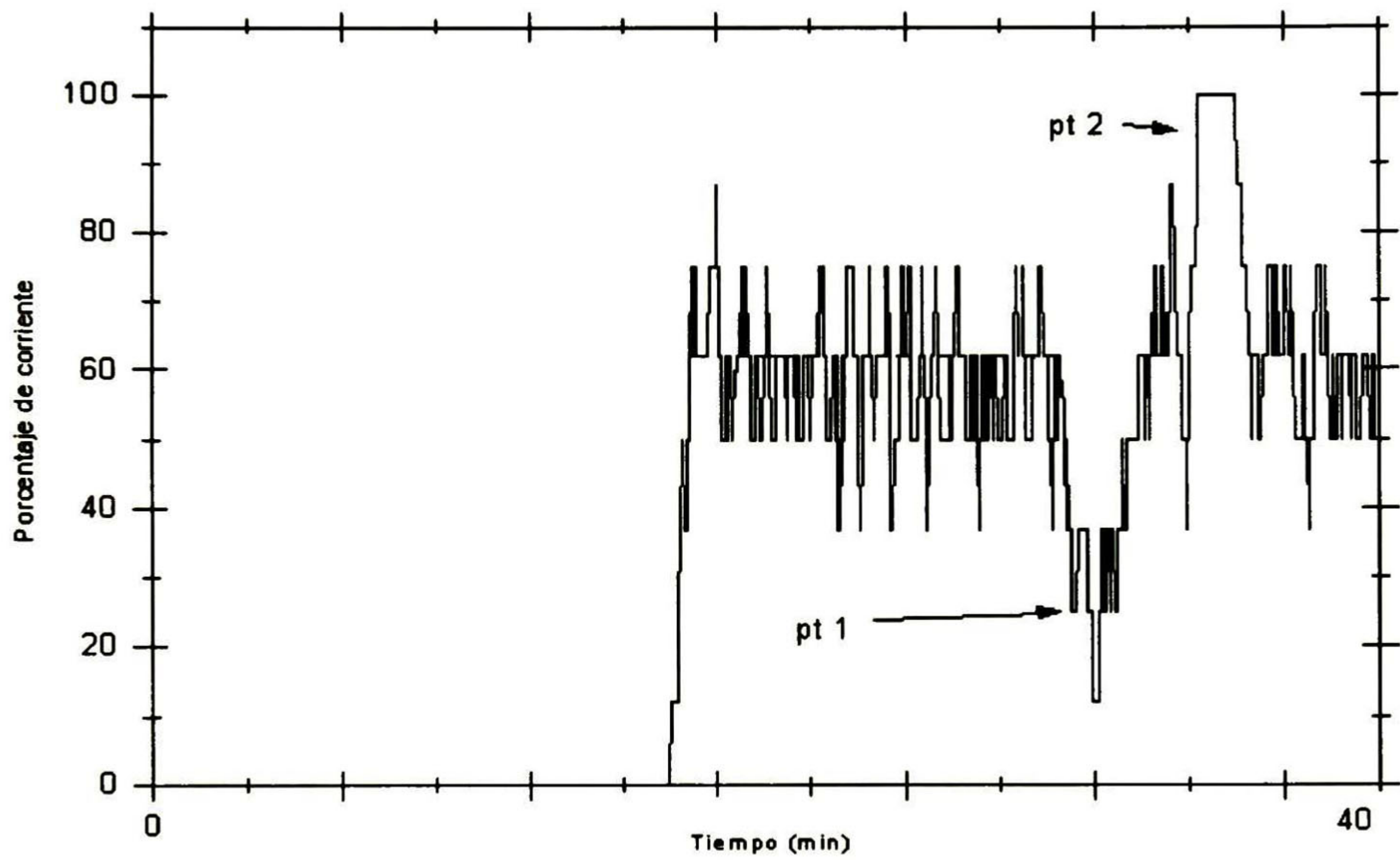


Figura 4.16: Señal de control hacia el actuador de la válvula 2

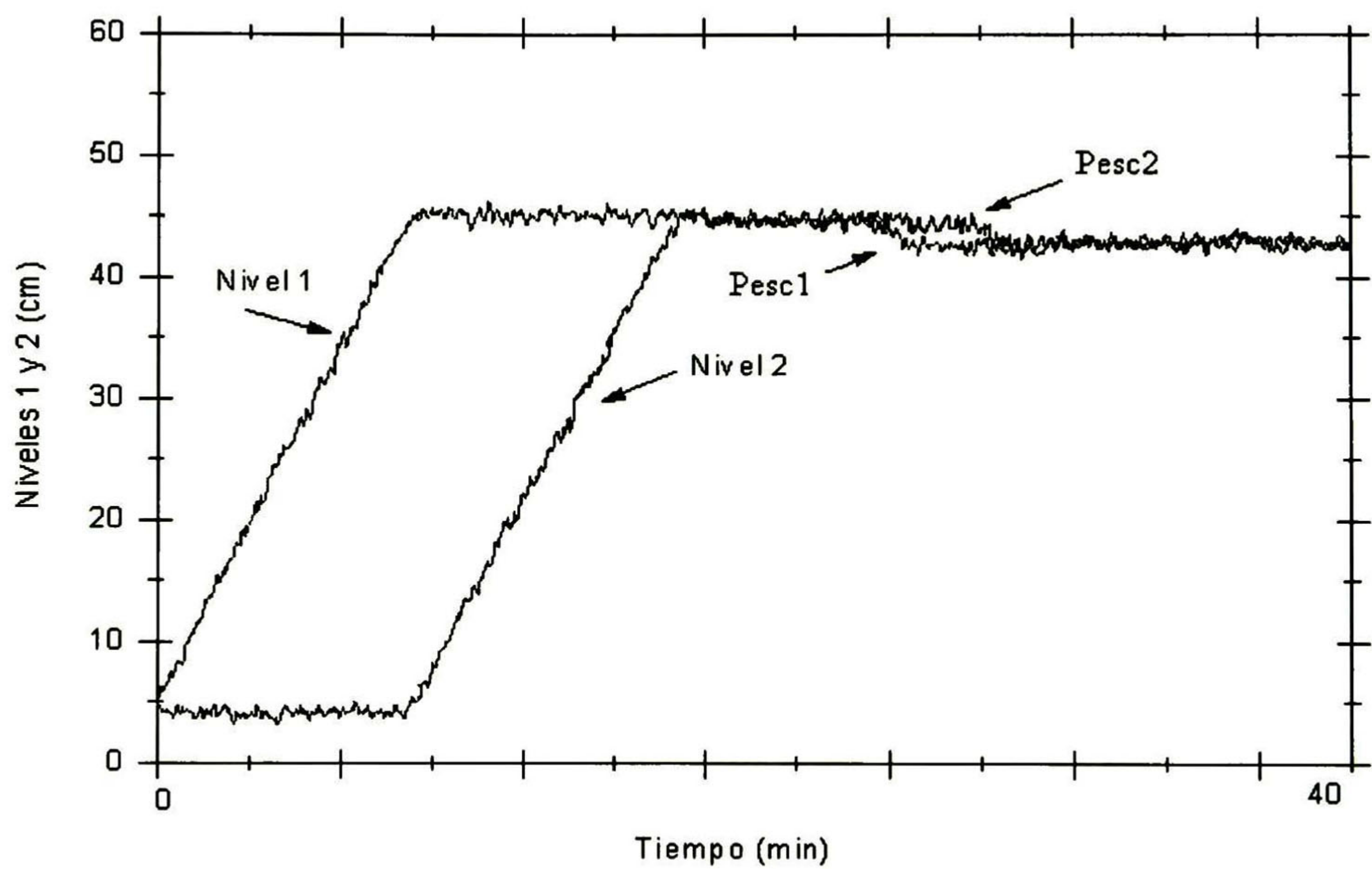


Figura 4.17: Respuestas en tiempo real de los niveles con el controlador LQ al aplicarle perturbaciones tipo escalón “*Pesc 1*” y “*Pesc 2*”

4.5.3 Controlador LQ para el Sistema de los Dos Tanques

En esta subsección se diseña un control LQ para el modelo (3.15), del sistema de los dos tanques, a este controlador se le denominará " LQ Multivariable". Para el diseño de este controlador se retoma las matrices A y B del modelo (3.18).

Las matrices de ponderación Q y R se han propuesto utilizando el mismo razonamiento que en la subsección anterior, esto es procurando que la norma de Q y R sean comparables. Un par de valores experimentales que satisface lo anterior y que proporciona buen desempeño son

$$Q = \begin{bmatrix} 2.45 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.45 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.45 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.45 \end{bmatrix}; \quad R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

con estos valores de ponderación el valor de la ganancia del controlador LQ multivariable " K_{LQM} " obtenida es

$$K_{LQM} = \begin{bmatrix} -1.4 & 1.2383 & 0.7 & -0.1205 \\ -0.7 & -0.1205 & -1.4 & 1.1178 \end{bmatrix}$$

Las respuestas en simulación del LQ Multivariable aplicados al modelo (3.15) son mostradas en la figura 4.18.

Las respuestas en tiempo real obtenidas con este controlador son mostradas en la figura 4.19.

Comparando las curvas de las figuras 4.18 y 4.19, se observa que las respuestas son muy similares, esto valida el modelo obtenido. Los tiempos de regulación de las perturbaciones aplicadas pt1 y pt2 son similares a los obtenidos por el controlador LQ para cada subsistema y son de 2.5 para pt1 y 2.1 para pt2. La diferencia entre este controlador y los anteriormente diseñados es que la estabilización de los niveles se lleva a cabo simultáneamente y se efectúa en un tiempo de 16.7 minutos. Estos tiempos se suman en la tabla 4-1. En las figuras 4.20 y 4.21 se muestran las señales de control para este controlador.

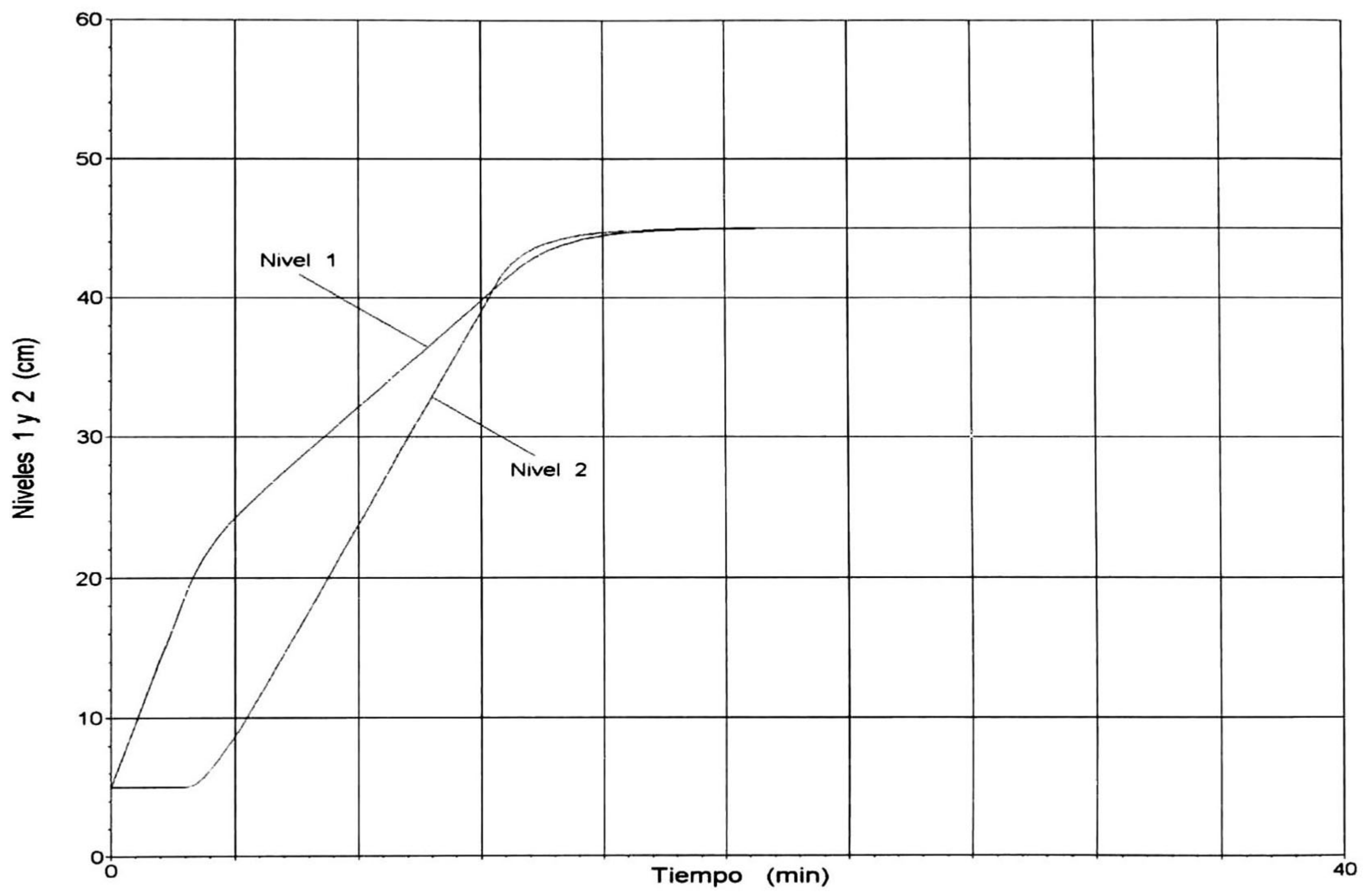


Figura 4.18: Respuesta de los niveles en la simulación con el controlador LQ *Multivariable*

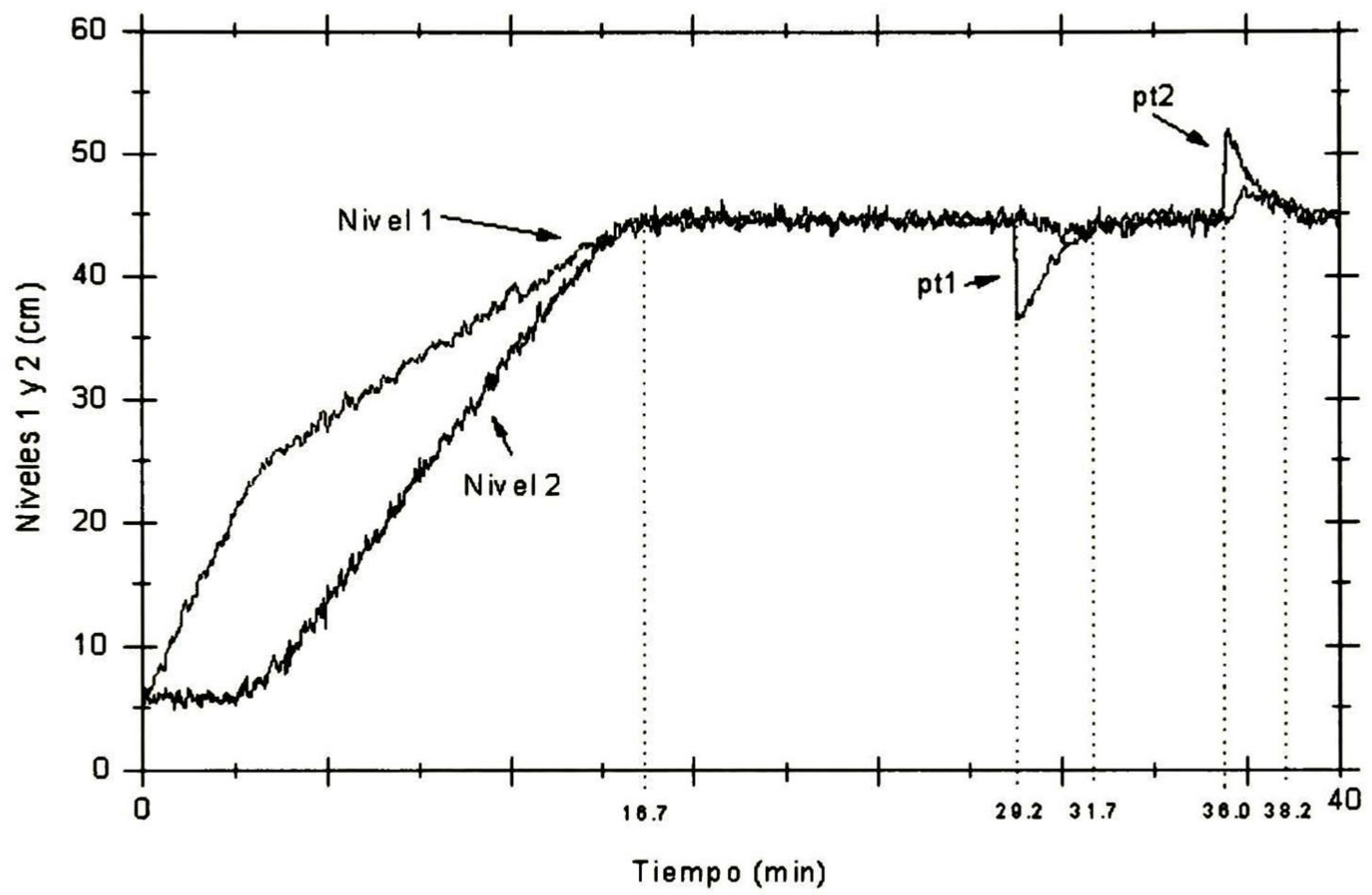


Figura 4.19: Respuestas en tiempo real de los niveles obtenidas con el controlador LQ Multivariable

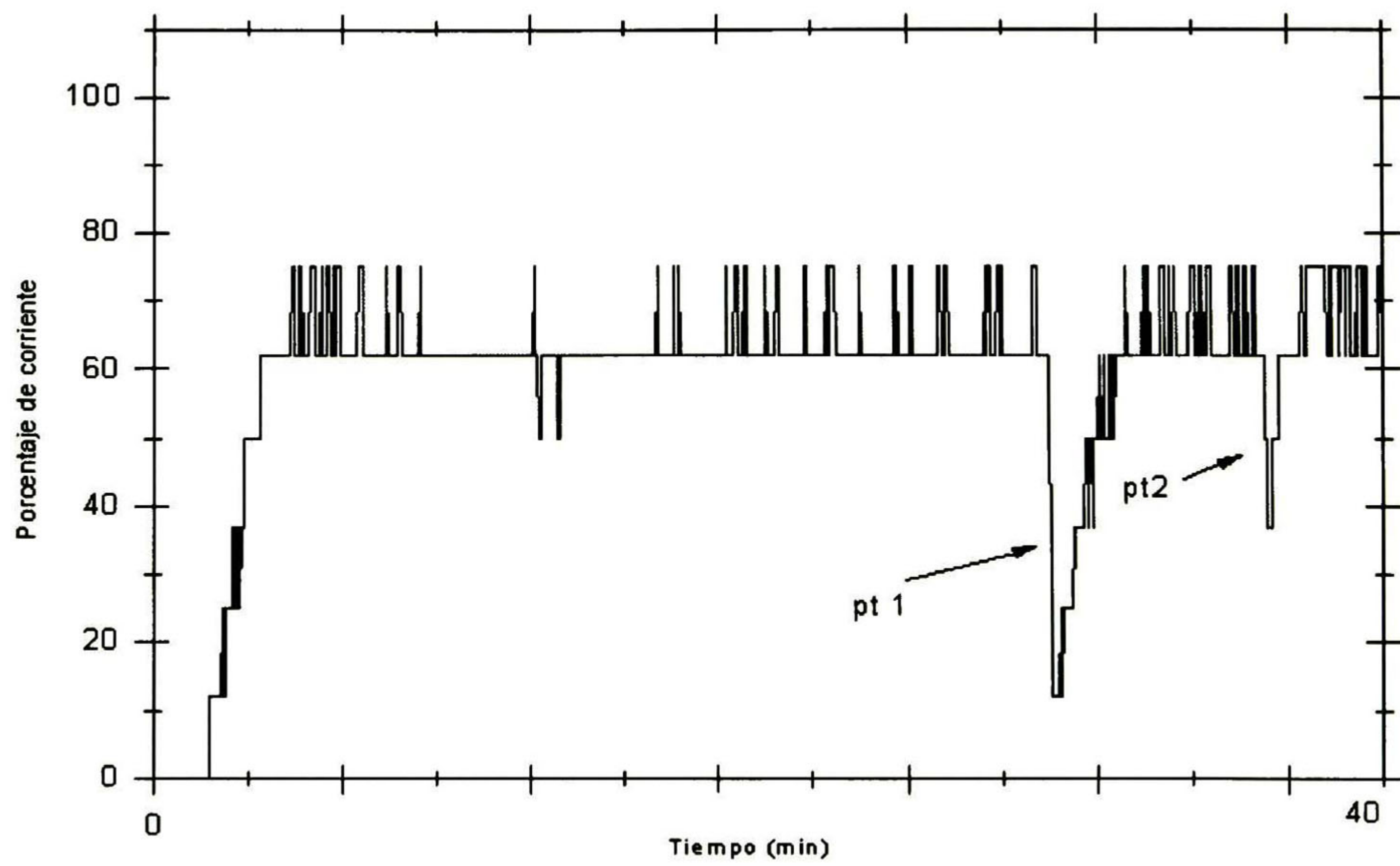


Figura 4.20: Señal de control hacia el actuador de la válvula 1

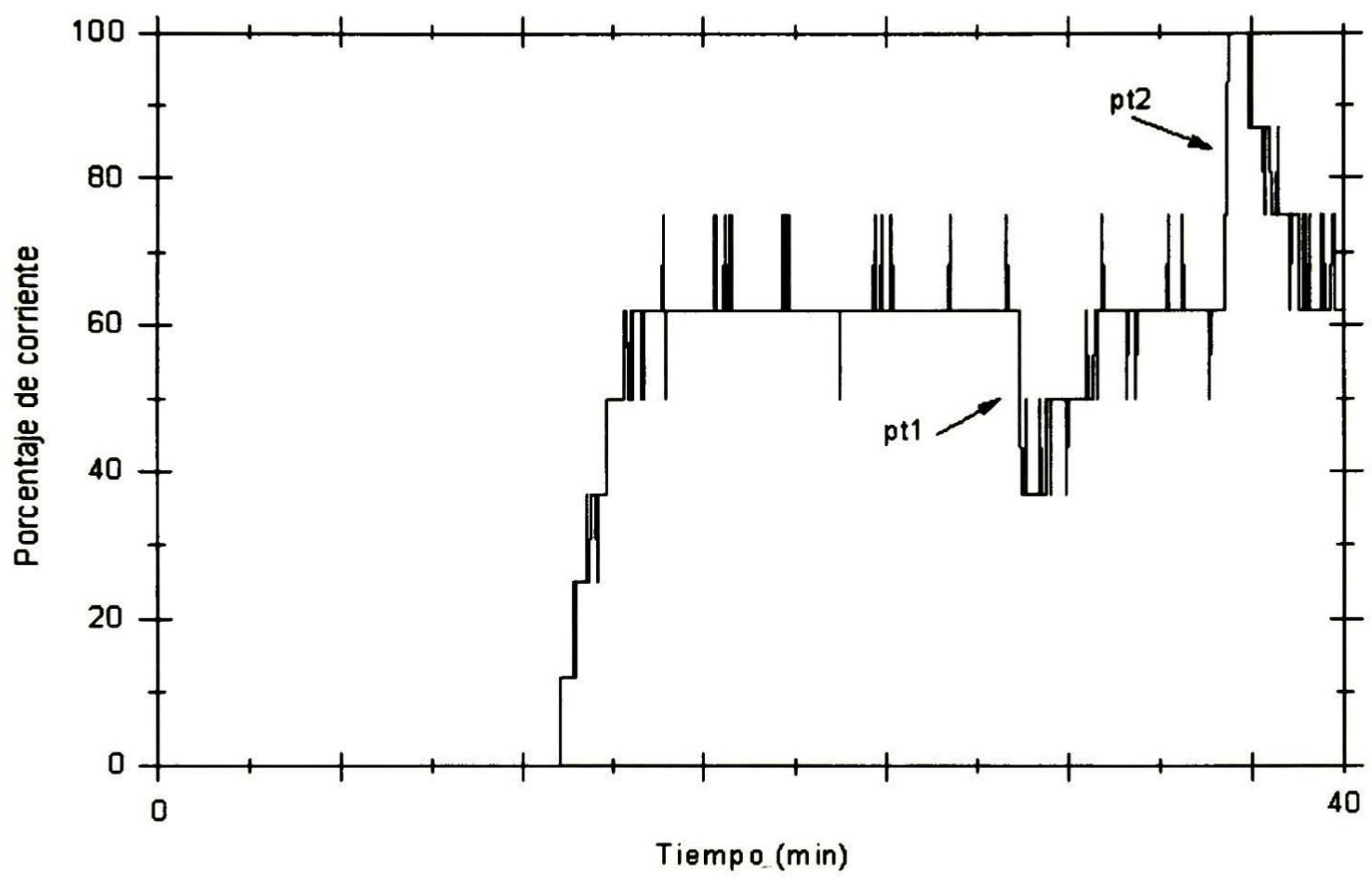


Figura 4.21: Señal de control hacia el actuador de la válvula 2

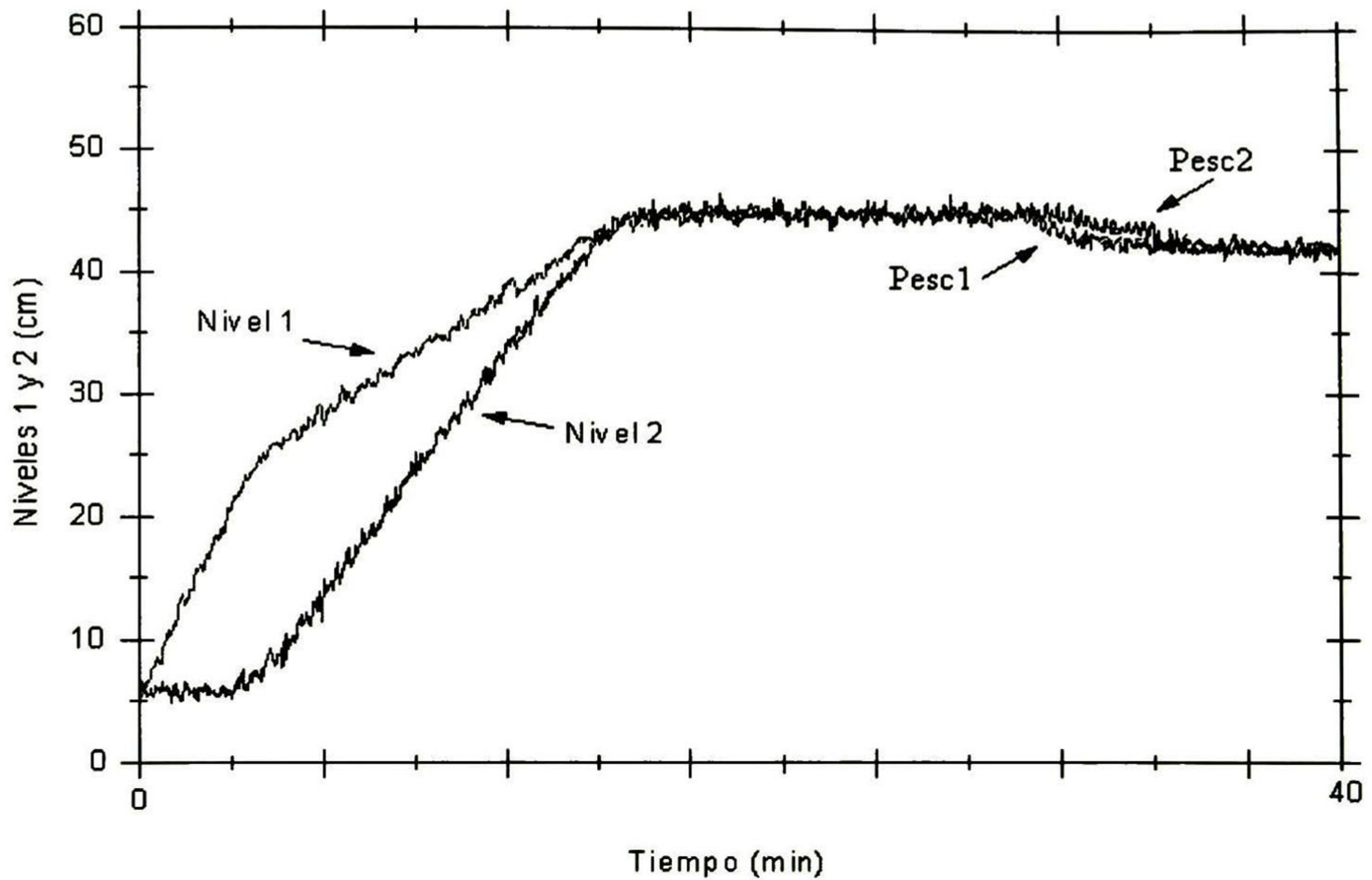


Figura 4.22: Respuestas en tiempo real de los niveles con el controlador *LQ multivariable* al aplicarle perturbaciones tipo escalón “*Pesc 1*” y “*Pesc 2*”

Como se aprecia en la figura 4.20, la aparición de la perturbación sobre el segundo tanque provoca que la señal de control del actuador de la válvula 1 intervenga también en el rechazo de dicha perturbación, corrección que no sucede en el sistema de control *LQ monovariable*. A continuación en la figura 4.22 se muestran las respuestas en tiempo real de los niveles en lazo cerrado, ante perturbaciones tipo escalón sobre el flujo

En la figura 4.22 se muestran las respuestas en tiempo real de los niveles, cuando se introducen perturbaciones tipo escalón “*Pesc 1*” y “*Pesc 2*” sobre los flujos de entrada del tanque 1 y tanque 2 respectivamente. En estas curvas puede observarse que ambas perturbaciones no son rechazadas.

4.5.4 Comentarios Sobre el Diseño de Controladores LQ

Para el diseño de un controlador LQ se requiere de la determinación de las matrices de ponderación Q y R , las cuales pueden ser propuestas en base a ensayo y error; de la información que se requiere del sistemas; del conocimiento de propiedades del LQ o de algoritmos publicados en la literatura tales como [1], [4], etc. Evidentemente el diseño requiere de un modelo lineal en variables de estado el cual puede ser *monovariable* o *multivariable*. Para este control, se debe tener acceso al estado, i.e a la altura de nivel y al flujo de salida³. Por otra parte, en este caso particular debido al ligero acoplamiento existente entre los tanques, el desempeño en regulación para los sistemas de control LQ *monovariable* y el LQ *multivariable* fueron muy similares en la regulación de las perturbaciones, aunque el desempeño fué diferente para llevar el sistema a su punto de operación. Evidentemente, si el efecto del acoplamiento entre ambos tanques hubiera sido mayor, el sistema *multivariable* no hubiera podido ser aproximado por los dos subsistemas desacoplados, lo cual implicaría que para regular el nivel, solo se hubiera podido diseñar el control LQ *multivariable*.

Finalmente se presenta la tabla 4-1, donde se resumen los tiempos de las respuestas proporcionados por cada controlador

Controlador	Estab. Nivel 1	Estab. Nivel 2	Reg. pt1	Reg. pt2
<i>Todo-Nada</i>	6.9	14.3	1.8	1.8
<i>P</i>	8.6	17.8	2.8	2.9
<i>PI</i>	8.6	17.8	2.6	2.8
<i>LQ</i>	8.6	17.8	2.1	2.0
<i>LQ Multivariable</i>	16.7	16.7	2.5	2.1

Tabla 4-1 Tiempo de respuesta para cada controlador (min)

³En el prototipo bajo estudio no se cuenta con un medidor de flujo, por lo que el flujo de salida suministrado a la computadora se calcula de acuerdo a la relación $F_o(t) \approx h(t)/R_0$ donde R_0 es la resistencia de la válvula que se tiene en el punto de operación.

Capítulo 5

Conclusiones y Comentarios

En este Proyecto de Tesis se desarrollaron una serie de controladores, los cuales uno a uno fueron implementados y analizados. Cada uno de los controladores, presentan ventajas y desventajas, pero es el diseñador quien determinará, de acuerdo a las circunstancias bajo las cuales se desea controlar el sistema, cual de estos controladores puede ser el que mejor se adapta sus necesidades.

Por otro lado, prototipos didácticos como el presente permiten a los alumnos desarrollar e implementar técnicas de control automático, apoyando de esta manera su formación académica y experiencia práctica, además de permitir la investigación de nuevas técnicas.

Esta tesis da el comienzo a una serie de estudios que pueden ser realizados sobre el prototipo tales como, implementación de observadores de orden reducido para estimar el flujo, análisis de robustez, cambio de configuración hidráulica, prueba de técnicas difusas y autosintonizables.

Bibliografía

- [1] Anderson B. and Moore J. "Linear System Optimisation with Prescribed Degree of Stability", PROC. IEE, Vol. 116, No 12, (1969).
- [2] Anderson B. and Moore J., "Optimal Control", Prentice Hall (1990).
- [3] Åström K. and Hägglund T., "PID Controllers: Theory, Design, and Tuning", Instrument Society of America, (1995).
- [4] Begovich O. and Ph. de Larminat, "Simple Methods for Synthesis of Weighting Matrices in L.Q. Control", ECC 91 European Control Conference, Grenoble, France, (July 2-5 1991).
- [5] B. Humberto, "Tesis de Maestría en proceso", (1998).
- [6] Cheung. T.F. and W.L.Luyben, "Liquid Level Control in Single Tanks and Cascades of Tanks with Proportional-Only and Proportional-Integral Feedback Controllers", Ind. Eng. Chem. Fundam., 18,15(1979).
- [7] C. A. Hernández, H. Bracamontes, "Diseño y Construcción de un Sistema Hidráulico-Térmico de Dos Tanques", Reporte Técnico del CINVESTAV-GDL en proceso, (1997).
- [8] Dale E. Seborg, Thomas F. Edgar and Duncan A. Mellichamp, "Process Dynamics and Control", Wiley, (1989).
- [9] Faires V. y Simmang C., "Termodinámica", UTEHA, Segunda Edición (1990).
- [10] Kailat T., "Linear Systems", Prentice Hall, (1980).
- [11] Kwakernaak H. and Sivan R., "Linear Optimal Control System", Wiley, (1972).

- [12] Manfred Morari and Peter J. Campo, "Model Predictive Optimal Averaging Level Control", *AIChE J*, 35, 4, (1989).
- [13] McDonal. K A., T.J.McAvoy, and A. Tits, "Optimal Averaging Level Control", *AIChE J.*, 32, 75 (1986).
- [14] Ogata K., "Modern Control Engineering", Prentice Hall, (1991).
- [15] Stephanopoulos G., "Chemical Proces Control", Prentice Hall, (1984).
- [16] Wonham W., "Linear Multivariable Control; A geometric Aproach", Springer-Verlar, (1985).

Apéndice A

Ecuación de *Bernoulli*

Para la obtención de la relación de F_o a través de la ecuación de *Bernoulli* es necesario realizar un análisis en el sistema, este análisis se realizará sobre los dos puntos que se muestran en la figura A.1 de la ecuación de balance de energía se tiene

$$\frac{P_2}{g\rho} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 = \frac{P_1}{g\rho} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1$$

donde P_i es la presión diferencial en el punto i ($i = 1, 2$); V_i es la velocidad del líquido en el punto i ; Z_i altura al eje de referencia en el punto i ; g es la gravedad; y ρ es la densidad del líquido. Suponiendo que en el punto 2, la velocidad de cambio es casi cero y que la presión atmosférica en ambos puntos, es la misma, se tiene

$$Z_2 = \frac{V_1^2}{2g} + Z_1$$

despejando la velocidad de cambio en el punto número 1

$$\frac{V_1^2}{2g} = Z_2 - Z_1$$

$$V_1 = \frac{1}{\sqrt{2g}} \sqrt{Z_2 - Z_1}$$

debido a que la velocidad de cambio en el punto 1, $V_1 = F_o$, $h = Z_2 - Z_1$ es la altura dentro del tanque y $\frac{1}{\sqrt{2g}}$ es constante, la cual puede ser llamada C_v se tiene

$$F_o = C_v \sqrt{h}$$

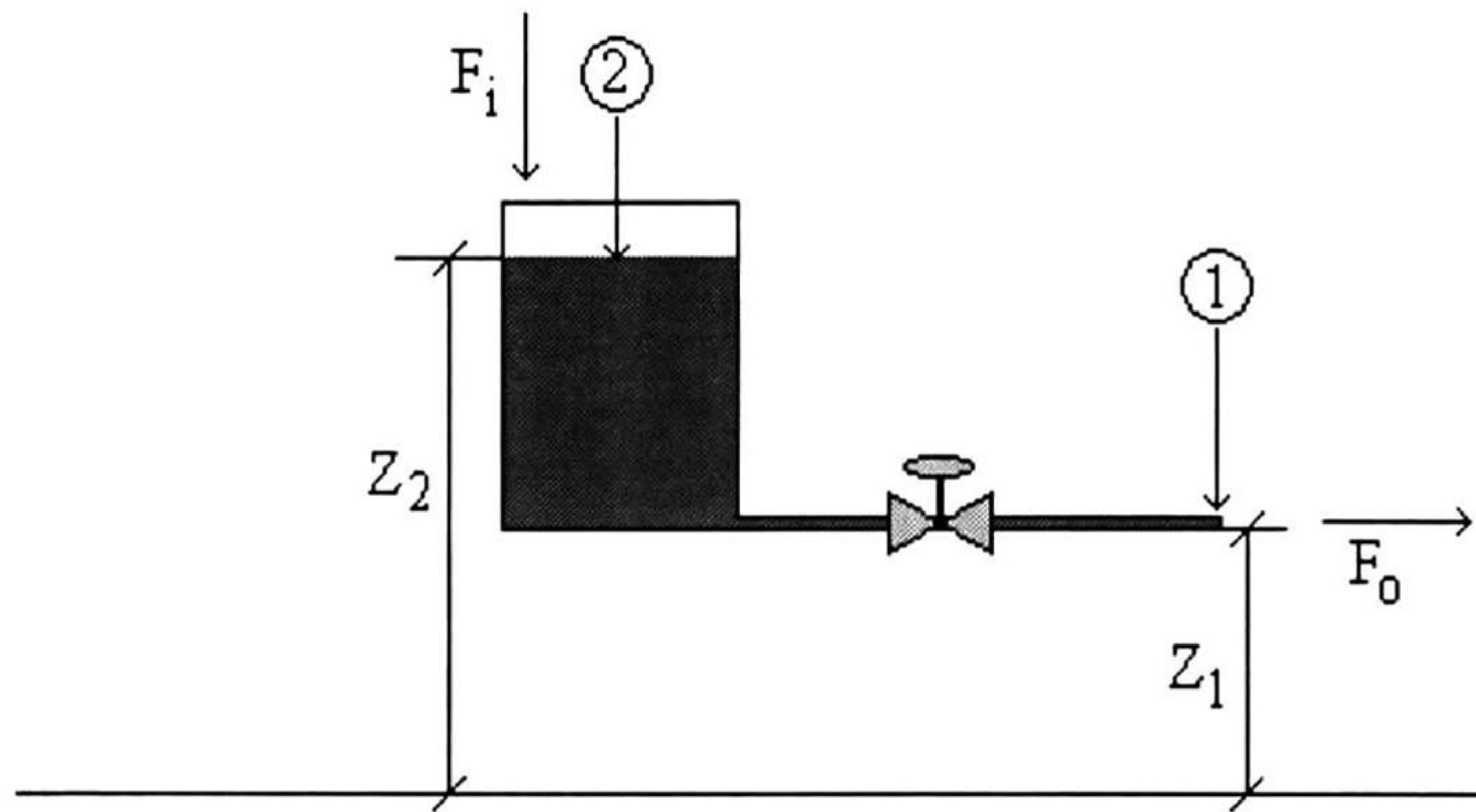


Figura A.1: Diagrama de energía de una tubería con un fluido que atraviesa las fronteras

la cual representa el flujo de salida del tanque a través de la válvula de descarga.

Apéndice B

Referencias Técnicas de la Identificación

La identificación paramétrica de la válvula se llevó a cabo con la utilización de equipo de medición e instrumentación proporcionados por el *CETI*¹, este equipo consistió de: un tanque para controlar presión; instrumental para medición de flujos, así como otras herramientas y dispositivos que hicieron posible la integración de la válvula a el sistema de pruebas y mediciones.

Como se muestra en la figura 3.1 del capítulo 3, la conexión se realizó utilizando placas de orificio de la marca *Honeywell*, a través de las cuales se medira la presión diferencial del flujo. Estas son seleccionadas de acuerdo a parámetros utilizados en el área hidráulica, principalmente se considera el número de *Reynolds*, éste relaciona las características y tipo de flujo que será medido con las características y tipo de placas de orificio a utilizar.

El equipo para medición es conocido como celda para presión diferencial de flujo, de la marca *Honeywell*, ésta fue conectada a un osciloscopio de *40MH* de la marca *Micronta*, el cual indicó gráficamente las respuestas de flujo obtenidas en el experimento.

El tanque utilizado está diseñado para mantener la presión interna constante.

La identificación se realizó poniendo el tanque controlado a una presión constante equivalente a 45 centímetros de altura, se introdujo a la válvula (que inicialmente se encontraba totalmente cerrada) un escalón de corriente

¹Centro de Enseñanza Técnica Industrial; Calle del Chaco 64, Frac. Colomos, Zapopan, Jal.

62 APÉNDICE B. REFERENCIAS TÉCNICAS DE LA IDENTIFICACIÓN

de 13.9 mA, esto es, apertura del 62% de la válvula y se gráfico la respuesta del flujo a través de la válvula, la cual se muestra en la figura 3.2 del capítulo 3, en donde se muestra que para este escalón de corriente, el flujo correspondiente es de 0.367l/seg.

Apéndice C

Sistema de Dos Tanques Hidráulicos

Diseño, Construcción y Control de un Sistema de Dos Tanques Hidráulicos

O. Begovich, B. Castillo, C. Hernández, H. Bracamontes

CINVESTAV-Guadalajara

45090 Guadalajara, Jal.

Tel. (3) 684-1580 Fax (3) 684-1708 e-mail obegovi@gdl.cinvestav.mx

Resumen: En este artículo se presenta el diseño, construcción y control de un sistema hidráulico con tanques para almacenamiento de líquidos. Para propósitos de comparación se diseñan y aplican técnicas de control clásicas ampliamente utilizadas como controladores "Todo-Nada", proporcional "P" y proporcional integrativo "PI" así como una técnica moderna de control tal como el regulador LQ (Linear Quadratic Regulator). Las respuestas en tiempo real del sistema obtenidas con los controladores diseñados se muestran. Así mismo se discute el desempeño de cada uno de estos controladores con el fin de derivar opciones adecuadas de control para este tipo de procesos.

I. INTRODUCCIÓN.

En muchos de los procesos industriales tales como embotellado, fermentación, producción de alimentos, refinación de azúcar, generación de energía eléctrica, etc. existen, entre muchos otros subsistemas, tanques para almacenamiento de fluidos, en los cuales un objetivo primordial es la regulación de nivel. Para cumplir con este objetivo se cuenta con sistemas de control automático, donde los controladores más utilizados son los de tipo Todo-Nada, P, PI, [1], [2], [3] y en muy pocas ocasiones controladores diseñados con técnicas de control moderna.

Dada la importancia del control de nivel de fluidos en la industria, en el CINVESTAV-Guadalajara se ha diseñado y construido un sistema hidráulico con tanques para almacenamiento de fluidos. El objetivo principal de este sistema es el de diseñar y probar físicamente esquemas de control que permitan valorar las bondades de cada uno de ellos con el fin de ofrecer una pauta a seguir en posibles aplicaciones en procesos industriales reales. Un segundo objetivo es el de ofrecer un sistema didáctico que pueda ser utilizado en laboratorios de control de licenciaturas y posgrados en donde los estudiantes puedan poner en práctica sus conocimientos teóricos y realizar investigación.

II. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA.

El sistema hidráulico se diseñó y construyó bajo las siguientes consideraciones:

- Permitir reconfigurar la geometría del mismo en diferentes formas, tales como cascada, vasos comunicantes, diferente disposición de válvulas, etc. (Fig.1).
- Utilizar válvulas y sensores de uso industrial.

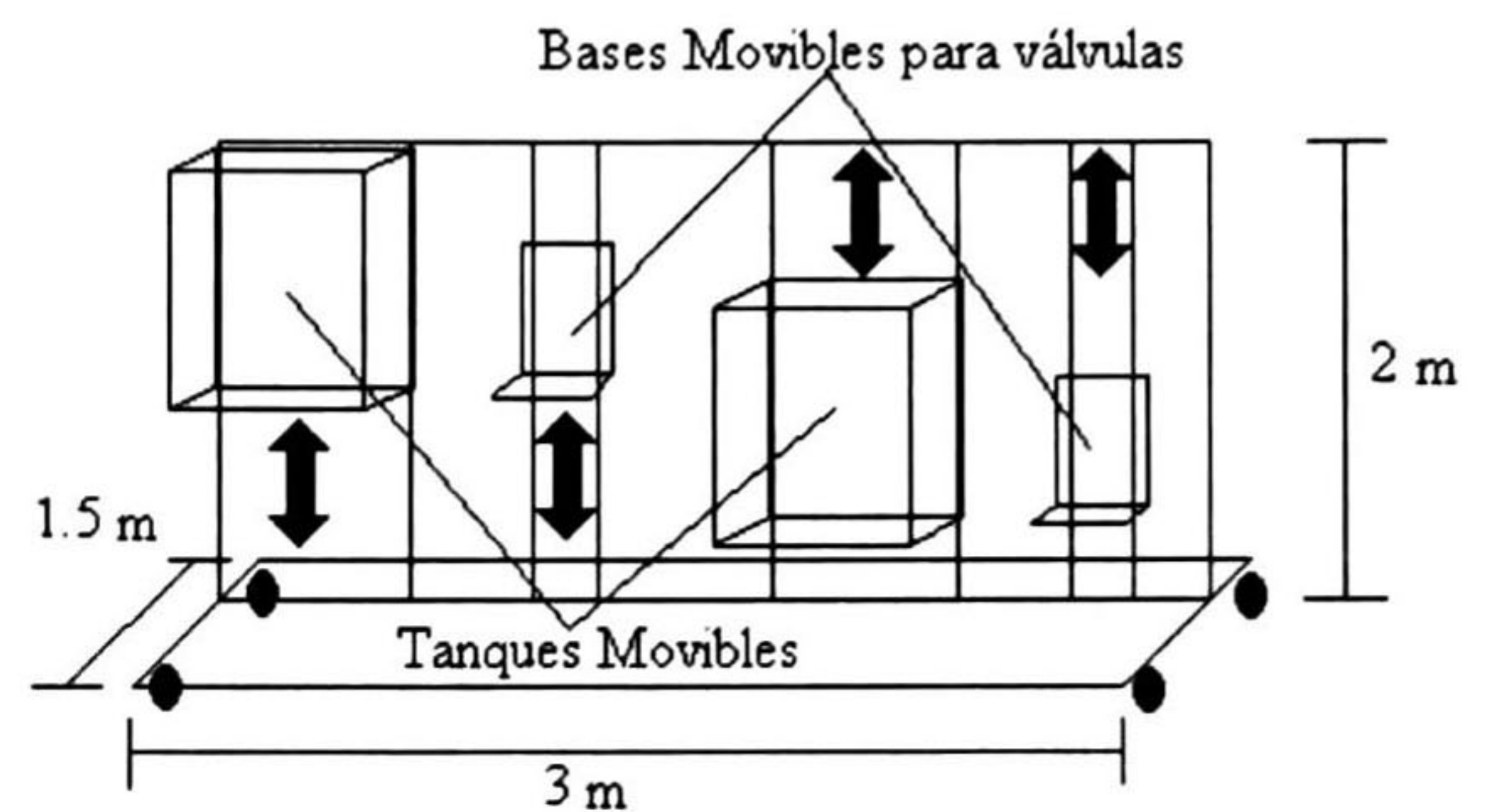


Fig 1
Estructura de sistema

El sistema está conformado por los siguientes dispositivos [4]:

- 1 *Computadora*: una computadora personal (PC) para realizar el procesamiento de datos y control del sistema.
- 2 *Tanques*: dos tanques de acrílico con un volumen de 96 l.
- 3 *Válvulas*: dos válvulas electromecánicas de tipo industrial, las cuales guardan una relación lineal entre la apertura y la corriente.
- 4 *Sensores*: dos sensores para presión diferencial, con una relación lineal entre el nivel y la corriente.
- 5 *Recirculación del agua*: depósito de agua con una bomba sumergible.

La etapa de adquisición de datos y señales de control se lleva a cabo a través de una tarjeta de 8-bits y una velocidad de muestreo de 0.2s, diseñada y construida para el sistema y residente en la computadora personal.

III. DISEÑO DE CONTROLADORES

El objetivo de los controladores diseñados es el de regular los

niveles de cada uno de los tanques, configurados físicamente en cascada como se muestra en la Fig. 2.

En el diseño de los controladores es deseable no saturar los actuadores y evitar alcanzar el nivel máximo de los tanques.

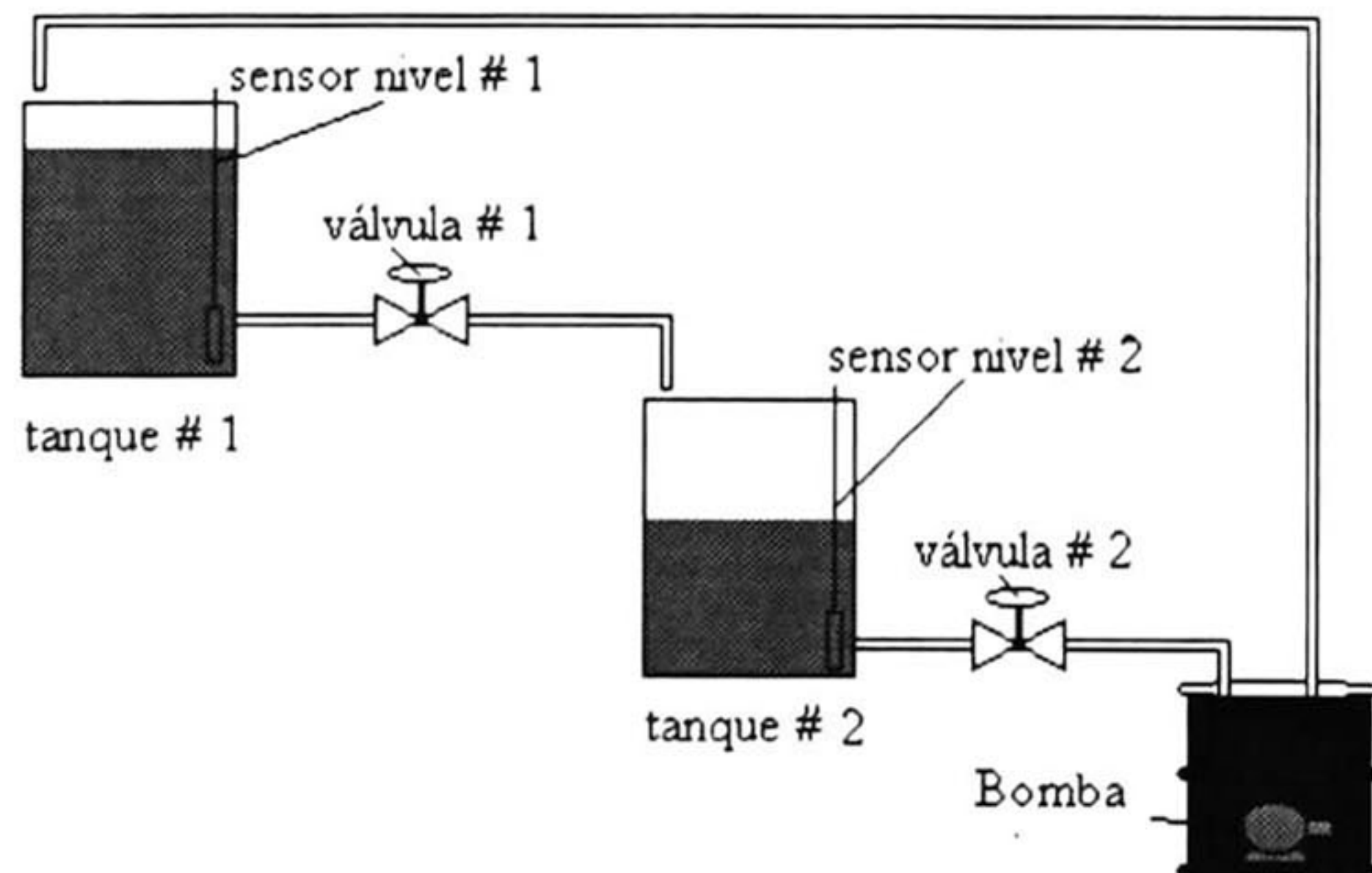


Fig. 2
Configuración de Cascada

Para el sistema configurado en cascada y las válvulas ubicadas a la salida de cada tanque se han diseñado cuatro controladores: un controlador tipo Todo-Nada, un P, un PI y un LQ. Para cada uno de ellos se presentan las respuestas en tiempo real y el análisis de las mismas.

Para probar los controladores diseñados se estableció como referencia un nivel de 45 cm y en el estado estacionario se introdujo una perturbación consistente en una extracción de agua instantánea en el tanque 1 (pt1), alrededor de los primeros 30 min., y una segunda perturbación (pt2) consistente en un aumento de nivel instantáneo en el tanque 2 entre los 30 y 40 min.

La duración de los experimentos fue de 40 minutos. Las condiciones iniciales en los niveles de los tanques fueron de 5 cm de nivel en el tanque 1 y 3.8 cm para el tanque 2.

Puesto que los acoplamientos entre los dos tanques son muy pequeños, en este artículo, se considera el sistema como desacoplado, por lo que se diseña una ley de control para cada sistema tanque-válvula.

1. Diseño del controlador Todo-Nada

La ley de control Todo-Nada diseñada para este sistema consiste en enviar un comando de corriente correspondiente a cierre total de la válvula si el nivel medido es inferior o igual al nivel de referencia y otro de apertura total de la válvula si es superior. Las repuestas en tiempo real obtenidas son mostradas en la Fig. 3

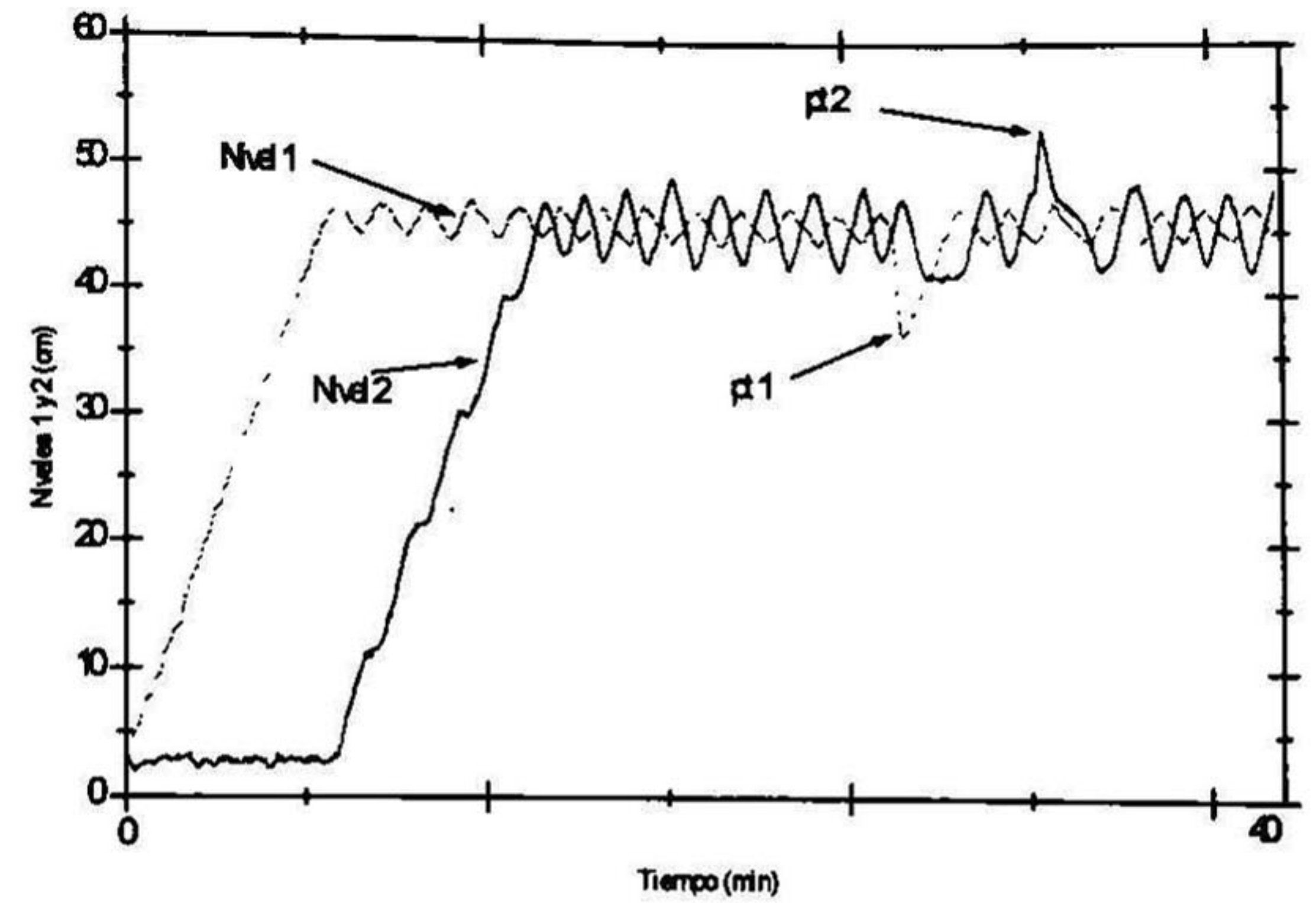


Fig.3
Respuestas de los niveles del sistema con un controlador "Todo-Nada"

Como puede apreciarse en la Fig. 3, el nivel de los tanques se encuentra oscilando alrededor del nivel de referencia, esta variación se debe al retardo que introducen las válvulas. En esta figura también puede observarse que una perturbación introducida sobre el tanque 1 afecta ligeramente al nivel del tanque 2, mientras que una perturbación sobre el tanque 2 no afecta el nivel del tanque 1, esto pone en evidencia que solo existe acoplamiento entre el tanque 1 sobre el 2 y que éste no es muy grande.

Finalmente, el control Todo-Nada, en sistemas de tanques con válvulas electromecánicas, puede ser útil cuando la precisión sobre el nivel no sea crucial.

2. Diseño del controlador P

En el controlador de tipo P [3] la señal de control es proporcional al error e entre el nivel de referencia y el nivel medido en el tanque, i.e.

$$u = K_p e(t)$$

Para el controlador diseñado el valor de la ganancia K_p se eligió de modo que no sature los actuadores y que al mismo tiempo permita una velocidad aceptable de regulación.

En la Fig. 4 se muestran las respuestas en tiempo real de nivel obtenidas

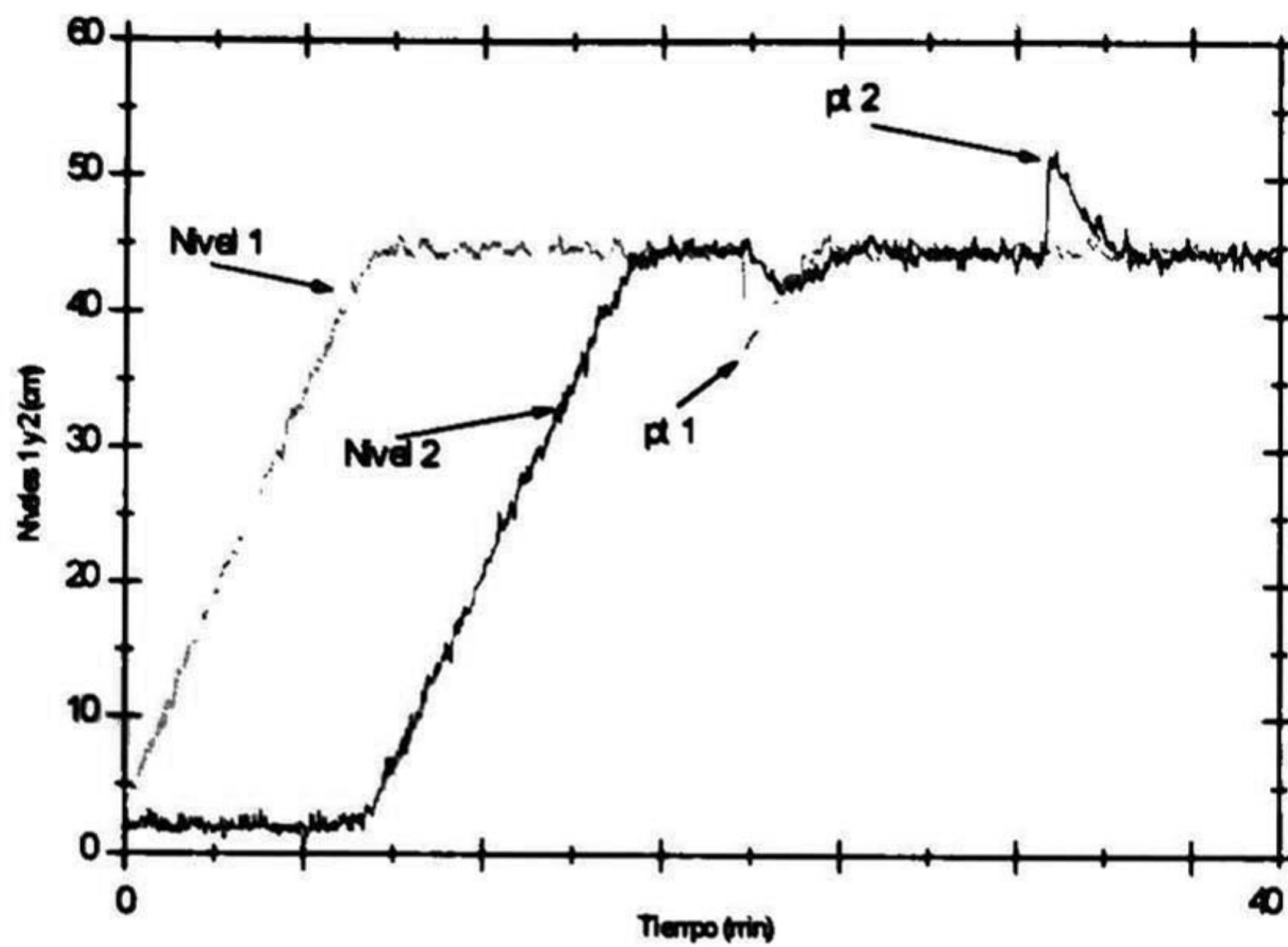


Fig. 4
Respuestas de los niveles del sistema utilizando un controlador "P"

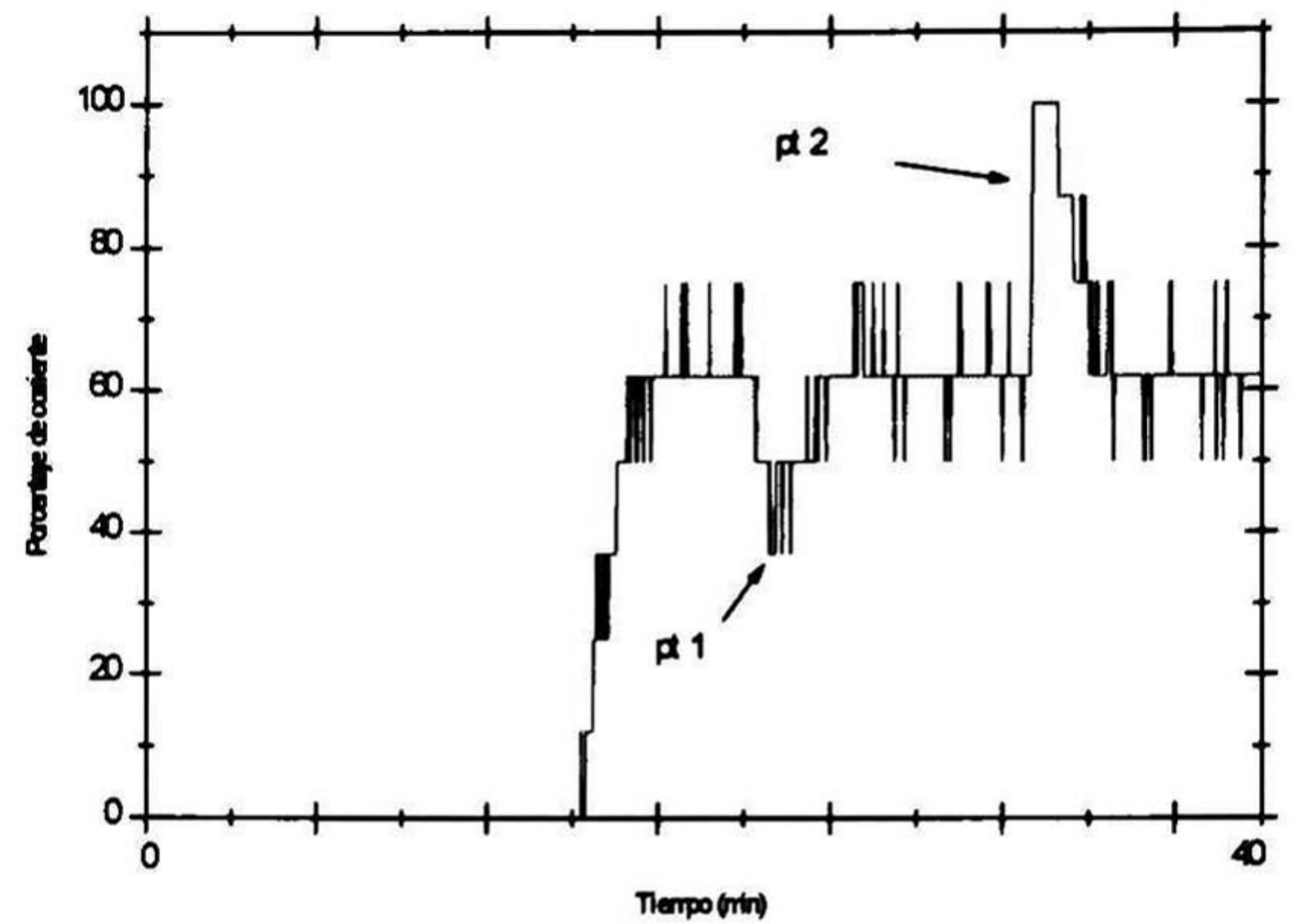


Fig. 6
Corriente de excitación del actuador de la válvula 2 del controlador P

Como se aprecia en la Fig. 4 el error de regulación tiende a cero con una velocidad aceptable, mientras que en la Fig. 5 y 6 puede apreciarse que la corriente¹ de control se satura en un número mínimo de puntos.

Se considera que el desempeño del Control tipo P es bastante adecuado para los fines perseguidos, esto aunado a la simplicidad de su diseño.

1 Diseño del controlador PI

En el controlador PI [3] la señal de control es proporcional al error y a la integral del error

$$u = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt$$

Los valores de las ganancias K_p y K_i se eligieron con un criterio similar al empleado en el controlador P.

En la Fig. 7, Fig. 8 y Fig. 9 se muestran las respuestas en tiempo real obtenidas. En ellas podemos observar que la regulación es aceptable y que el desempeño es muy similar al obtenido con el controlador P.

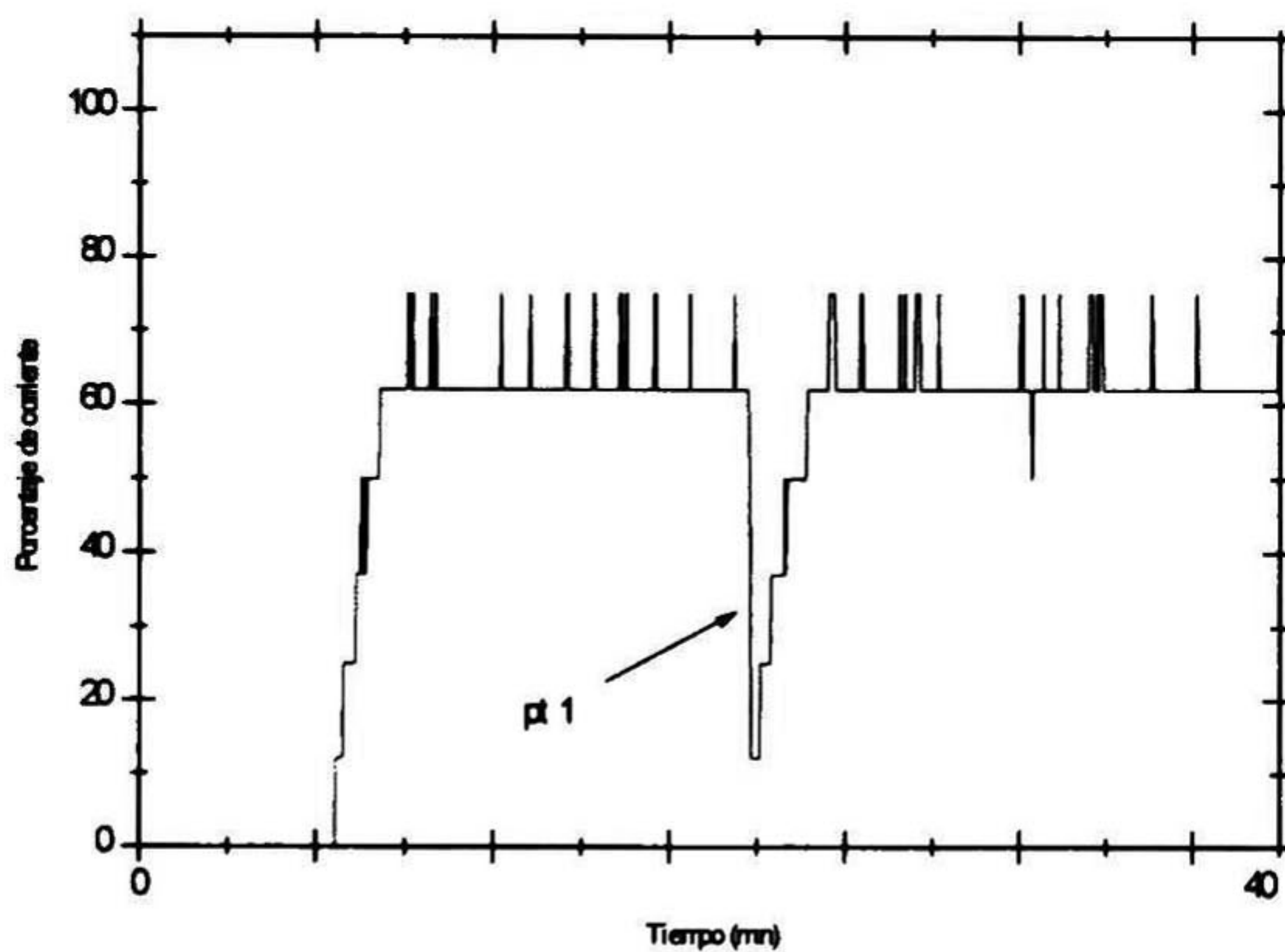


Fig. 5
Corriente de excitación del actuador de la válvula 1 del controlador P

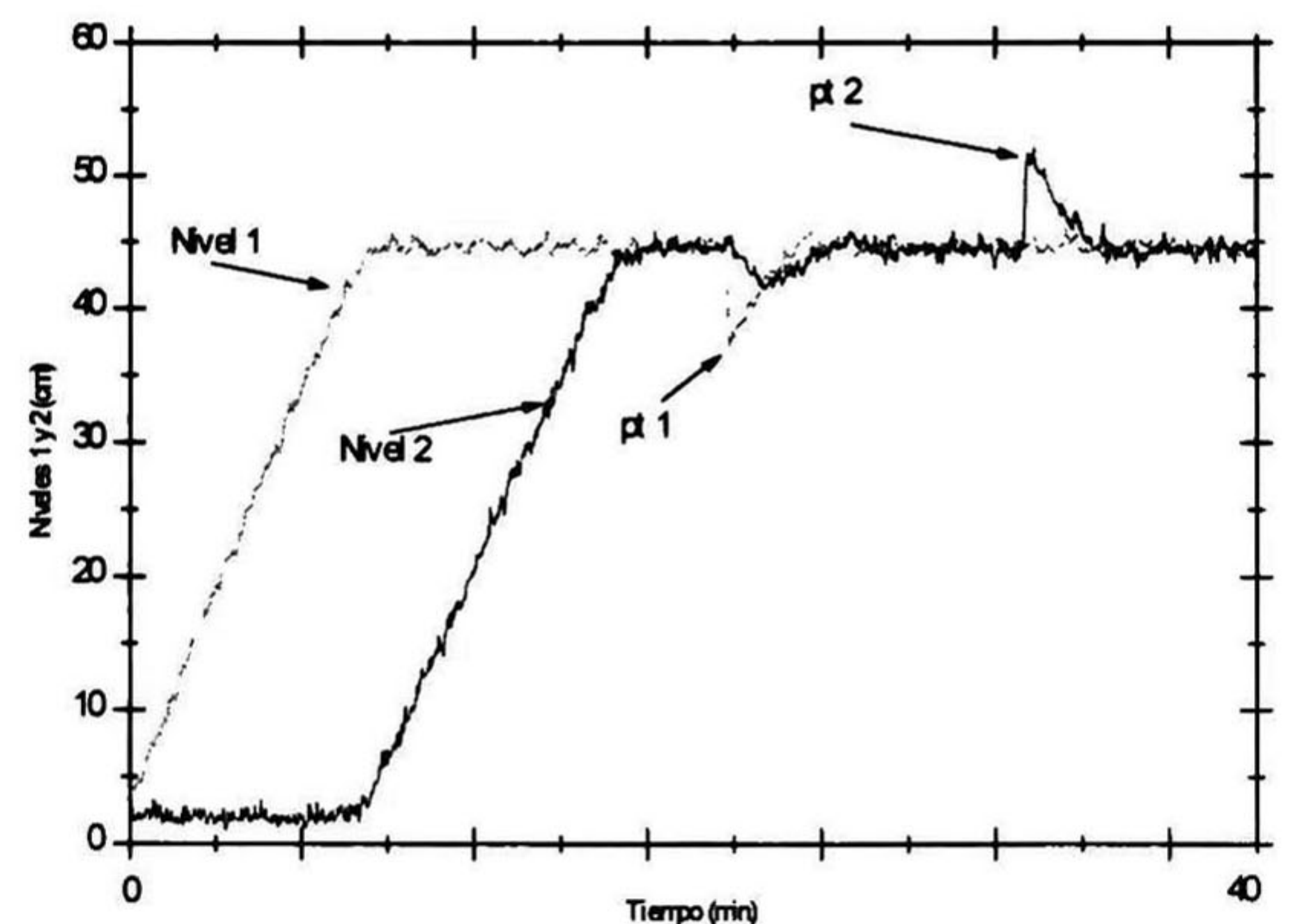


Fig. 7
Respuestas de los niveles del sistema utilizando un controlador "PI"

¹Nótese que la corriente está dada en porcentaje (0-100% equivale 4-20 mA). Esta relación será utilizada a lo largo del artículo.

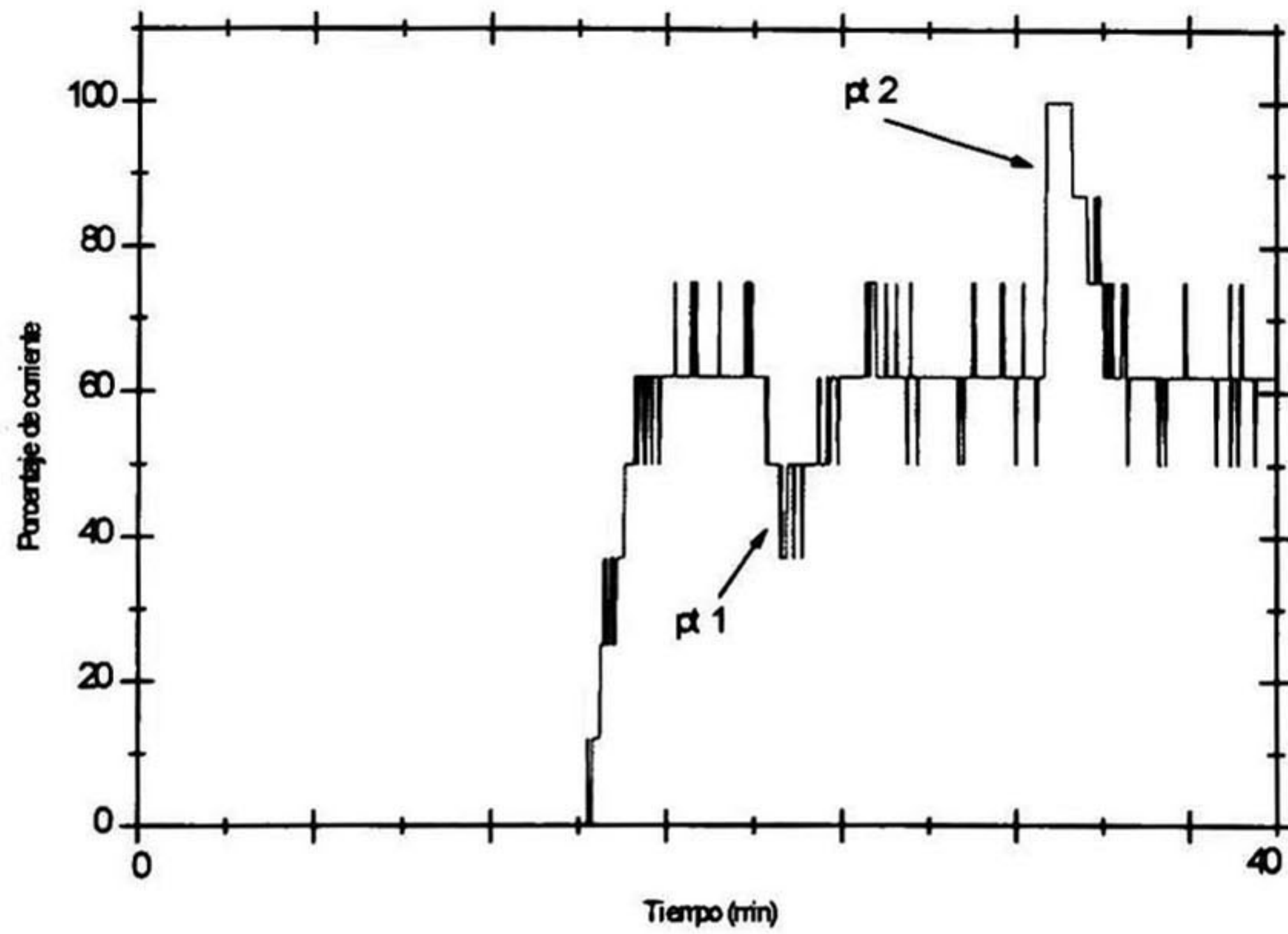


Fig. 8
Corriente de excitación del actuador de la válvula 1 del controlador PI

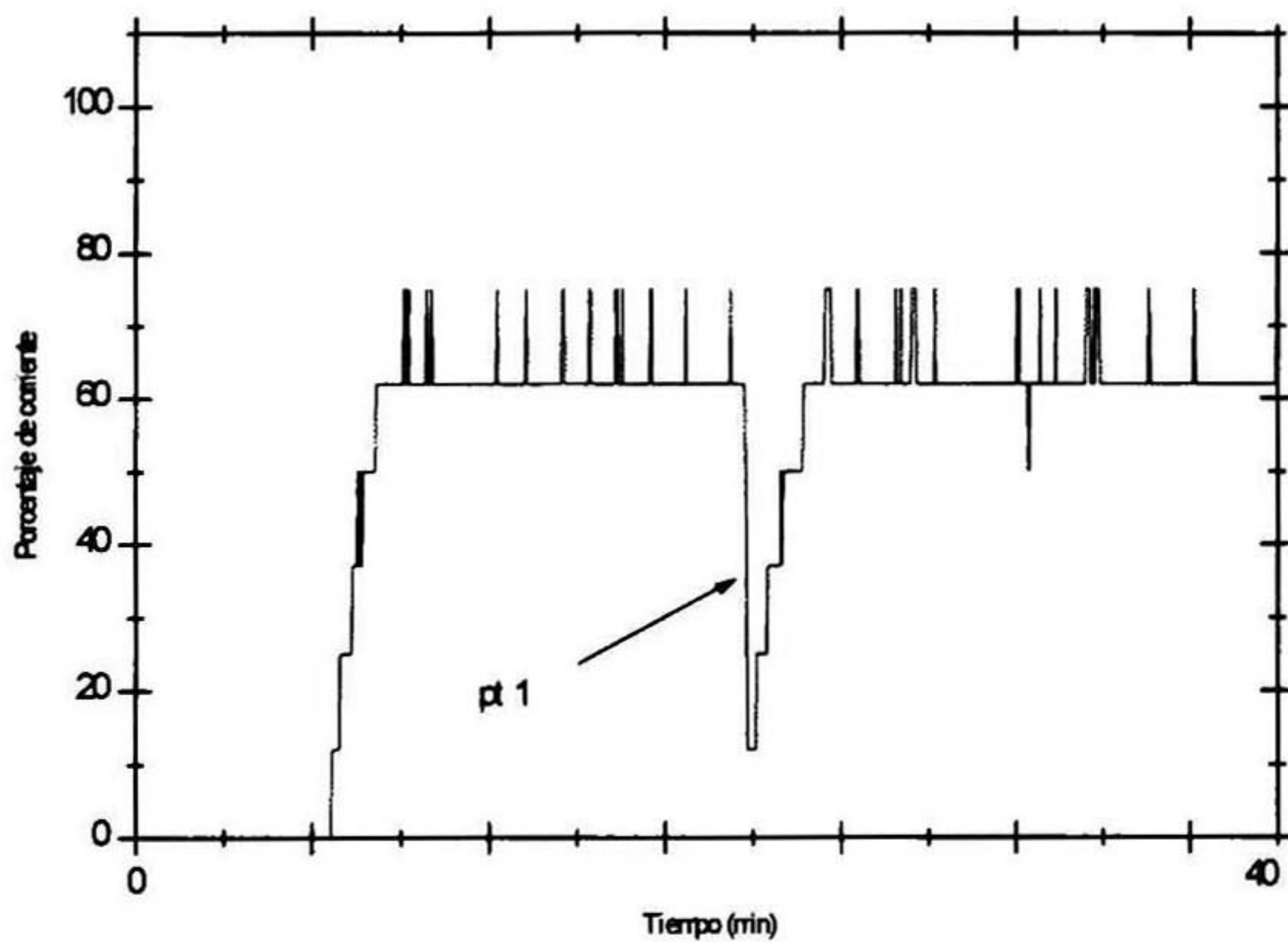


Fig. 9
Corriente de excitación del actuador de la válvula 2 del controlador PI

4. Diseño del controlador LQ

En el diseño de un controlador LQ [5], [6], el modelo matemático del sistema es indispensable. Para la obtención de dicho modelo, se ha recurrido a la ecuación de balance de masa (4.1) para un tanque así como al modelo dinámico de las válvulas. La razón de incluir en el modelo del sistema, al modelo de las válvulas, es debido a que éstas cuentan con una dinámica que no es suficientemente rápida comparada con la dinámica de los tanques. El modelo matemático de la válvula se obtuvo a partir de identificación paramétrica en base a las respuestas *flujo de salida vs tiempo* de la válvula [7].

La ec. de balance de masa esta dada por

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \rho F_i - \rho F_o \quad (4.1)$$

donde ρ es la densidad del líquido almacenado, F_i y F_o son

los flujos de entrada y de salida del tanque respectivamente y V es el volumen dentro del tanque el cual es igual a Ah (donde A es el área transversal del tanque y h la altura del nivel). De aquí

$$\frac{d(\rho Ah)}{dt} = \rho F_i - \rho F_o$$

como A y ρ son constantes,

$$A \frac{dh}{dt} = F_i - F_o \quad (4.2)$$

Para obtener el modelado matemático de la válvula, se realizó el análisis de las respuestas *flujo de salida vs tiempo* de ésta. Aplicando un escalón unitario de corriente a la válvula, con el sistema en el punto de operación, se obtuvo la gráfica de la Fig. 10.

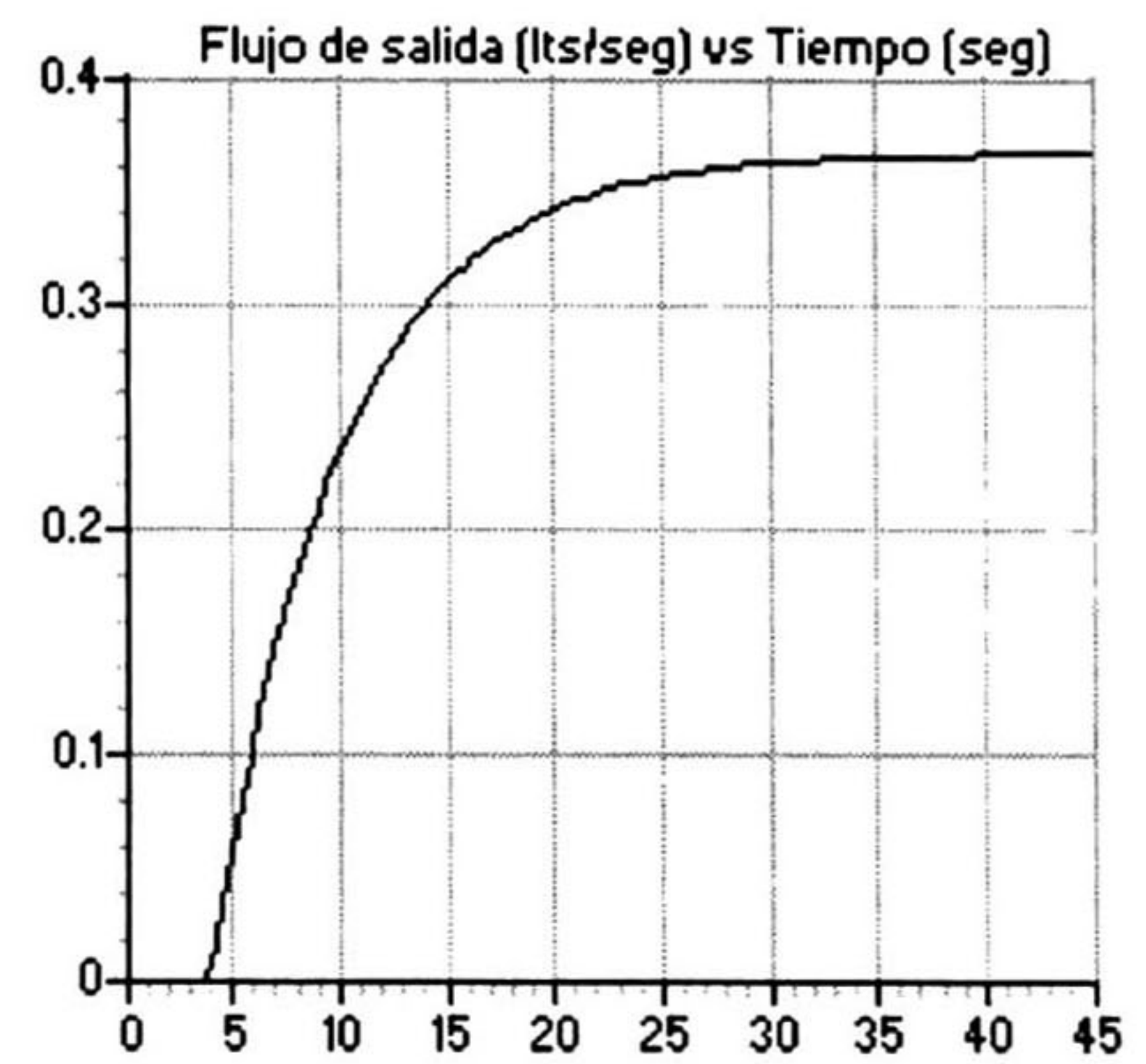


Fig. 10
Respuesta del flujo de salida de una válvula ante un escalón de corriente

De la gráfica anterior se obtuvo la siguiente función de transferencia

$$\frac{f_o}{i} = \frac{e^{-4s}}{6s+1}$$

Cuya realización en variables de estado es

$$\dot{f}_o = -\frac{f_o}{6} + \frac{i(t-4)}{6} \quad (4.3)$$

donde f_o es el flujo de salida del tanque a través de la válvula en el punto de operación e $i(t-4)$ es la corriente aplicada a la válvula, la cual presenta un retardo de 4 segundos.

De las ecuaciones (4.2) y (4.3) se obtiene.

$$\begin{bmatrix} \dot{h} \\ \dot{f}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{A} \\ 0 & -\frac{1}{6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ f_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{6} \end{bmatrix} i(t-4) + \begin{bmatrix} \frac{1}{A} \\ 0 \end{bmatrix} f_i$$

$$Q = \begin{bmatrix} 1.5 & 0 \\ 0 & 1.5 \end{bmatrix}$$

$$R=1$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ f_o \end{bmatrix}$$

Debido a que el retardo de la válvula es comparativamente menor a la constante de tiempo dominante del sistema, será despreciado, por lo cual,

$$\begin{bmatrix} \dot{h} \\ \dot{f}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{A} \\ 0 & -\frac{1}{6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ f_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{6} \end{bmatrix} i(t) + \begin{bmatrix} \frac{1}{A} \\ 0 \end{bmatrix} f_i$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ f_o \end{bmatrix}$$

Definiendo

$$x(t) = \begin{bmatrix} h(t) \\ f_o(t) \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{A} \\ 0 & -\frac{1}{6} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{6} \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_p = \begin{bmatrix} \frac{1}{A} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$u(t) = i(t)$$

$$d(t) = f_i(t)$$

se tiene

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_p d(t)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

que es la realización en variables de estado para un solo tanque y válvula.

Las matrices de ponderación Q , y R sobre el estado y el control respectivamente se eligieron de manera que se tenga un compromiso intermedio entre la penalización del control y la velocidad de regulación. Algunos de los valores que cumplieron el anterior compromiso son:

Con estos valores de ponderaciones el valor de la ganancia LQ " K_{LQ} " es

$$K_{LQ} = \begin{bmatrix} 1.8276 & 1.2247 \end{bmatrix}$$

Las repuestas en tiempo real obtenidas con este control son mostradas en la Fig. 11, Fig. 12 y Fig. 13.

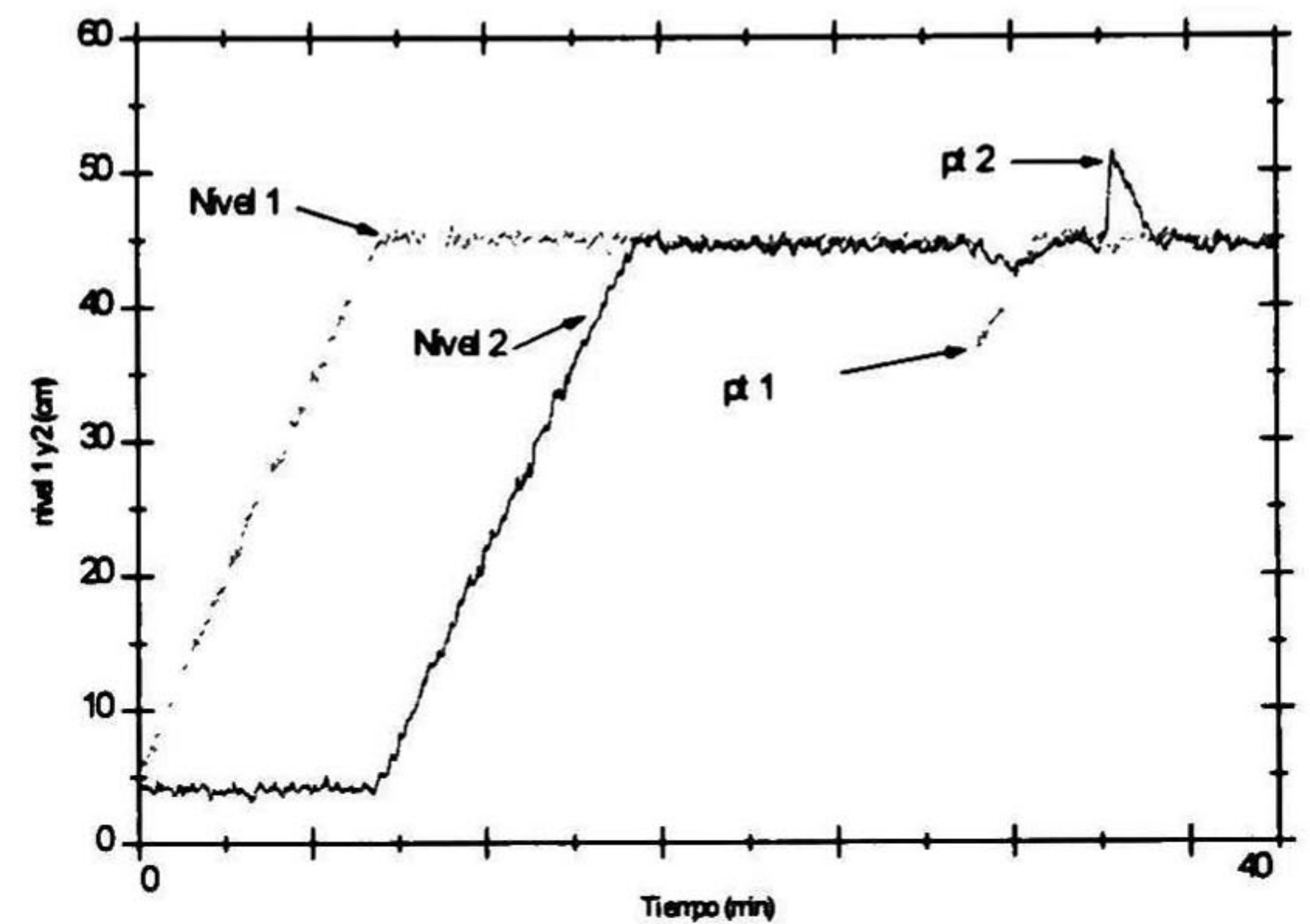


Fig. 11
Respuestas de los niveles del sistema utilizando un controlador "LQ"

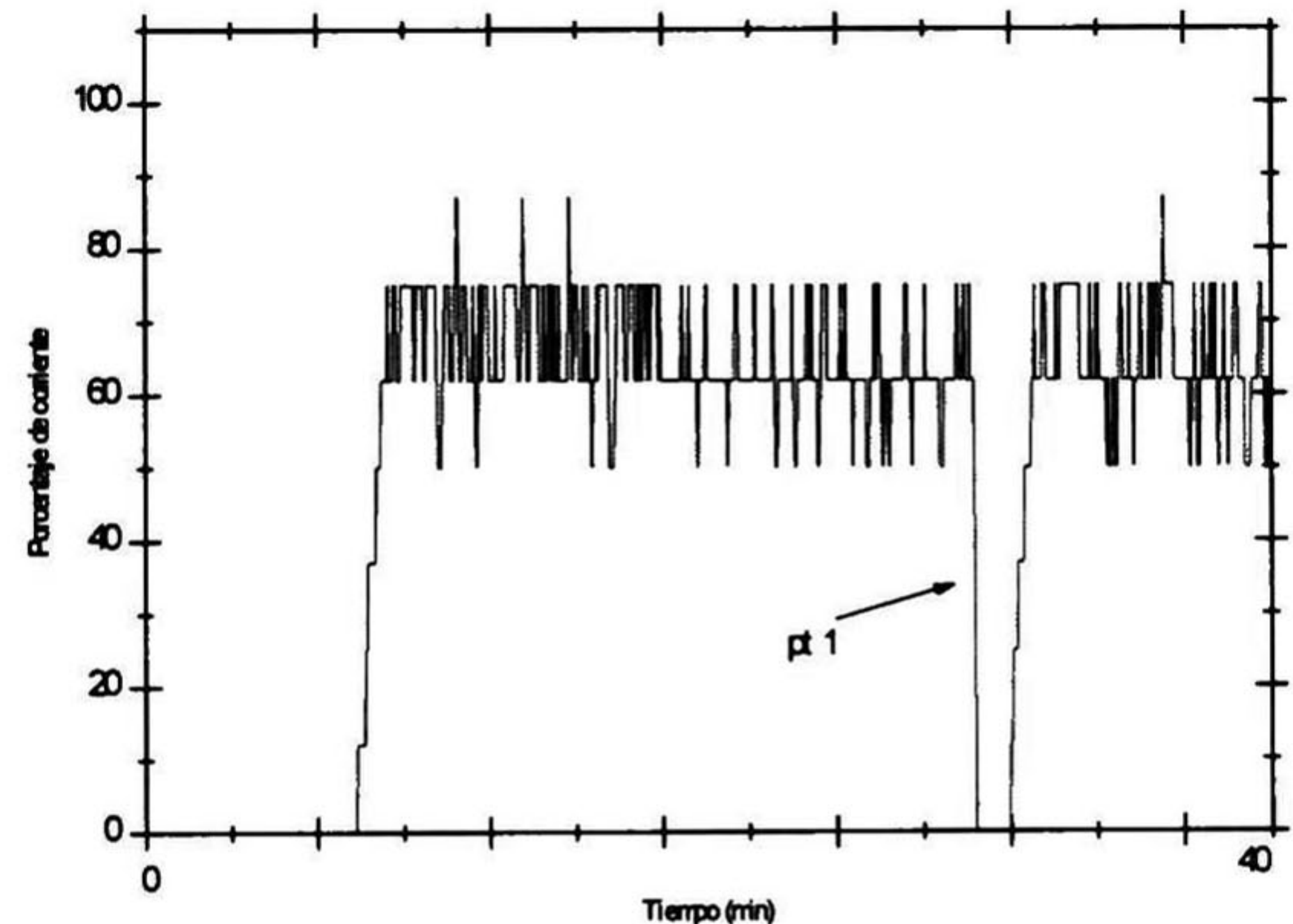


Fig. 12
Corriente de excitación del actuador de la válvula 1 del controlador LQ

Hall (1990).

[7] Ogata K., "Modern Control Engineering", Prentice Hall, (1991).

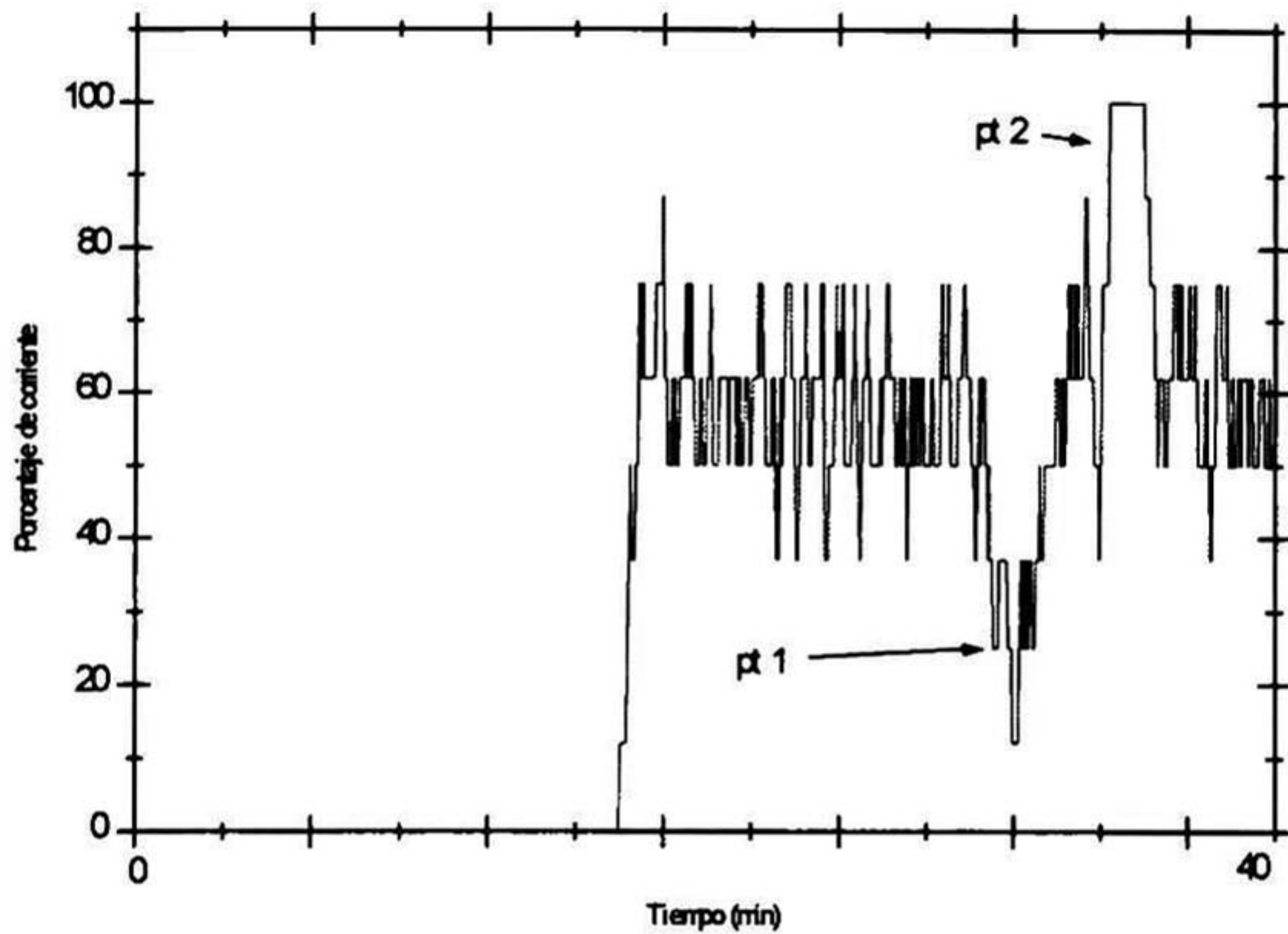


Fig. 13

Corriente de excitación del actuador de la válvula 2 del controlador LQ

De las figuras anteriores puede verse que el desempeño del sistema con el control LQ es similar nuevamente al obtenido con el controlador P.

IV. CONCLUSIONES

De los experimentos anteriores se puede concluir que el controlador tipo P para el sistema en cuestión es una buena opción debido a su buen desempeño en regulación, convenientes señales de control, facilidad de diseño y programación.

Finalmente se debe añadir que prototipos como el presentado en este artículo representan una opción adecuada para diseñar y probar algoritmos de control en tiempo real, además de proporcionar conocimientos sobre aspectos tecnológicos sobre dichos procesos, y servir como apoyo en la enseñanza.

V. BIBLIOGRAFÍA

[1] Stephanopoulos G., "Chemical Process Control", Prentice Hall, (1984).

[2] Dale E. Seborg, Thomas F. Edgar, Duncan A. Mellichamp, "Process Dynamics and Control", Wiley, (1989).

[3] Astrom K. and Hagglund T., "PID Controllers: Theory, Design and Tuning", 2nd ed. Instrument Society of America, Research Triangle Park, (1995)

[4] "Diseño y Construcción de un sistema Hidráulico de Dos Tanques", Reporte Técnico del CINVESTAV-Guadalajara en proceso.

[5] Kwakernaak H. and Sivan R., "Linear Optimal Control System", Wiley, (1972).

[6] Anderson B. And Moore J., "Optimal Control", Prentice

Apéndice D

Método de ajuste *Ziegler-Nichols*

El método de ajuste *Ziegler-Nichols* consiste en analizar la respuesta en frecuencia del sistema en lazo cerrado.

Este método se resume con los siguientes pasos:

- Llevar el sistema a el nivel de operación deseado
- Utilizando únicamente la parte proporcional del controlador, se introduce una variación en el punto de operación y se varia la ganancia hasta que el sistema se encuentre oscilando continuamente. La frecuencia a la que el sistema se encuentra oscilando continuamente se le denominará ω_c frecuencia de cruce y la Amplitud de la oscilación m .
- Se calculan las siguientes cantidades:

$$\text{Última Ganancia } K_u = \frac{1}{m}$$

$$\text{Último Periodo } P_u = \frac{2\pi}{\omega_c} \quad \text{min/ciclo.}$$

- Usando los valores calculados K_u y P_u se calculan los valores de las ganancias utilizando la tabla 1 de formulas

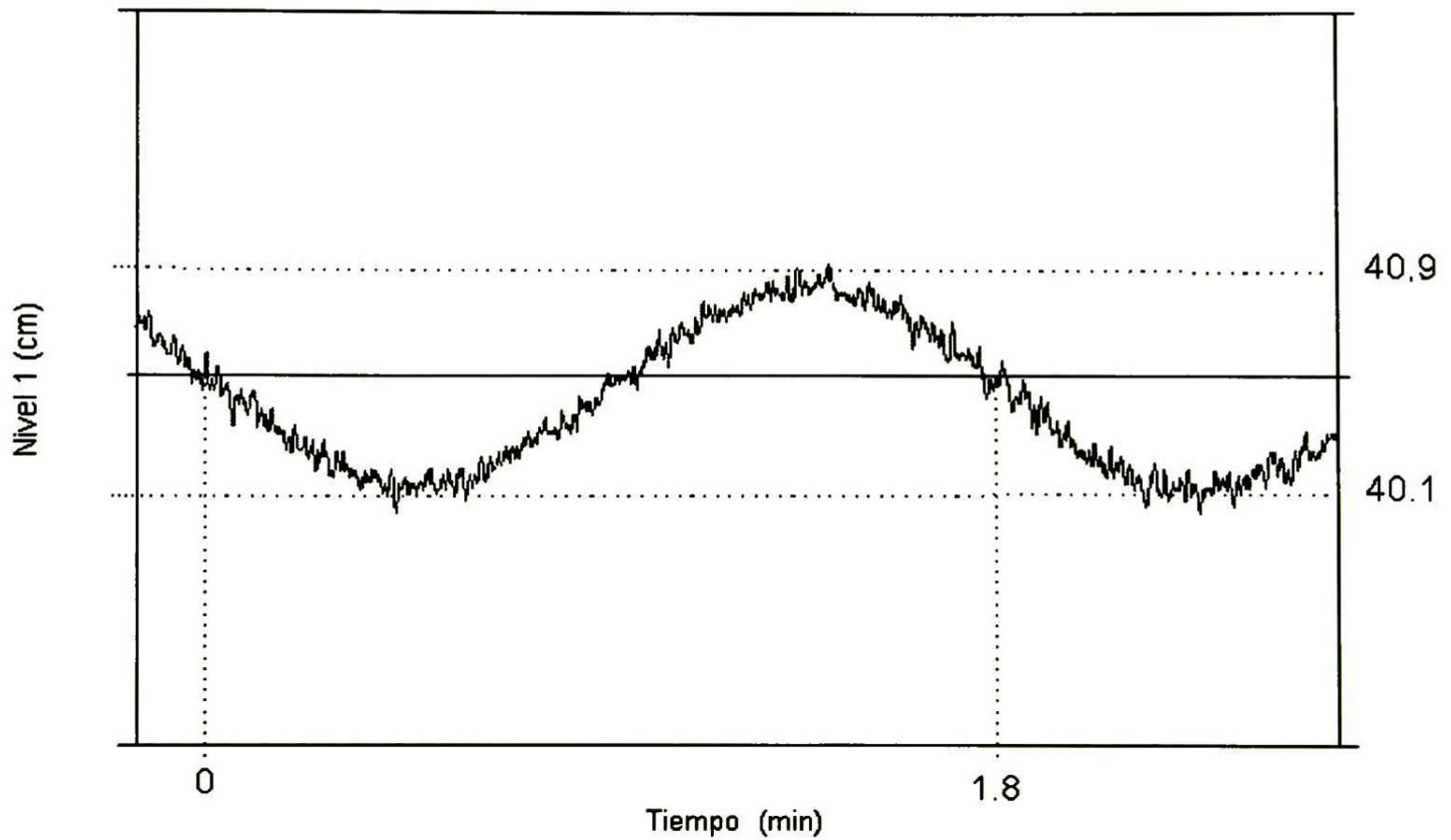


Figura D.1: Oscilación del nivel, bajando el punto de operación un 10 % y variando el valor de la ganancia del controlador P

Parte	K_c	T_i (min)	T_d (min)
Proporcional	$\frac{K_u}{2}$		
Proporcional-Integral	$\frac{K_u}{2.2}$	$\frac{P_u}{1.2}$	
Proporcional-Integral-Derivativo	$\frac{K_u}{1.7}$	$\frac{P_u}{2}$	$\frac{P_u}{8}$

Tabla 1.- Formulas para calcular los valores de los parámetros para el controlador PID

Para nuestro caso en particular, la gráfica de la figura D.1 ayudará a obtener los valores de las variables ω_c y m

El valor de las variables, necesarias para obtener los valores paramétricos del controlador P y PI son $\omega_c = 0.5556$ y $m = 0.8$, sustituyendo los valores de las variables en las formulas de la tabla 1 se obtiene

Para el controlador P el valor de la ganancia $K_c = 0.625$

Para el controlador PI los valores de la ganancia y del tiempo de integración son $K_c = 0.568$ y $T_i = 9.4342$

Apéndice E

Modelo Interno

En este apéndice se muestra que el efecto de una perturbación escalón sobre el flujo de entrada es equivalente al efecto de una perturbación d sobre la altura cuyo modelo interno se deducirá enseguida. Representando gráficamente la ecuación de balance de masa cuando F_i es un escalón se tiene la figura E.1 aplicando álgebra de bloques sobre la figura E.1 se tiene un esquema equivalente en la figura E.2 donde puede observarse que el modelo interno de la perturbación d sobre la altura es

$$\frac{1}{A_s s^2}$$

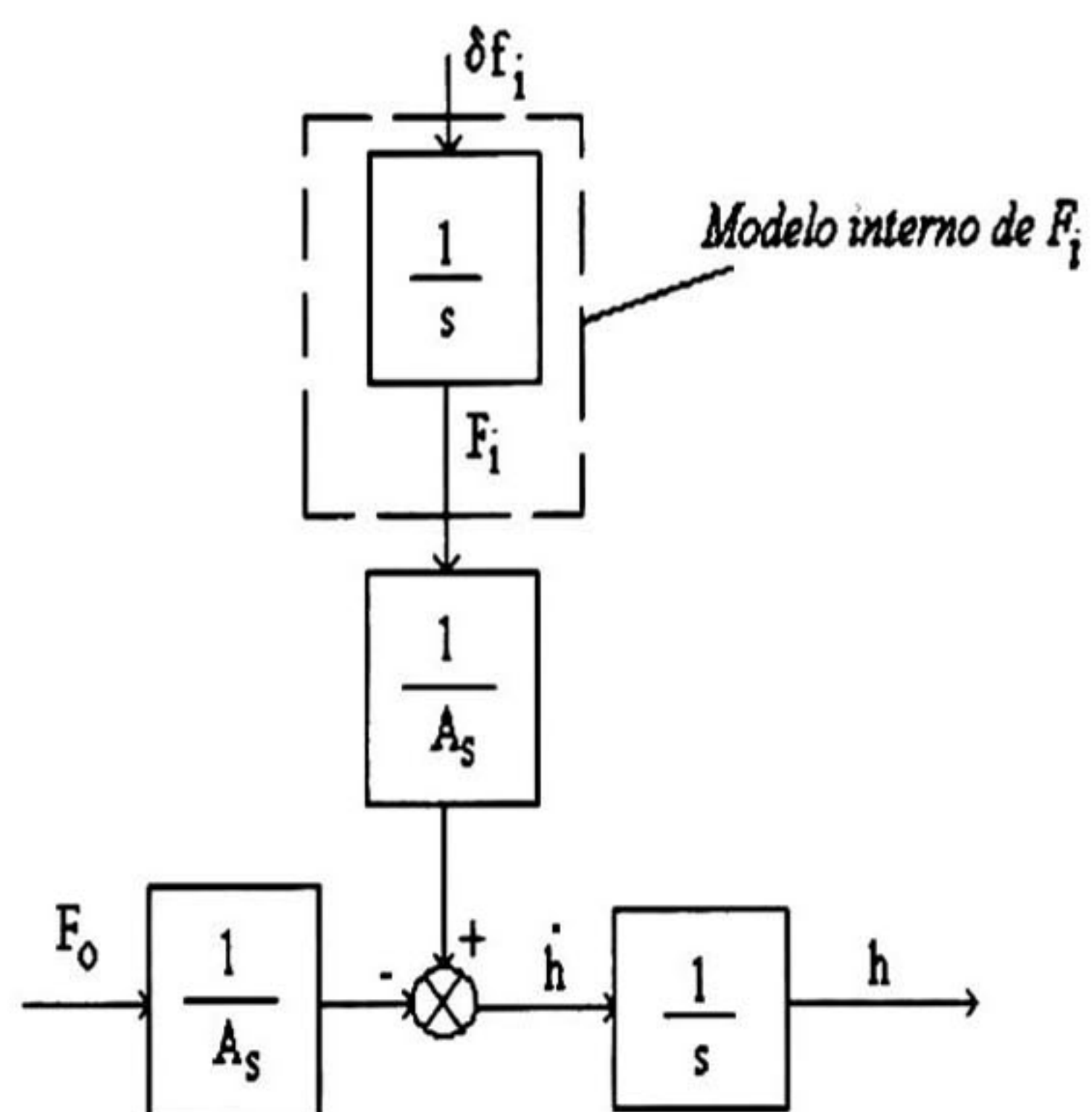


Figura E.1: Diagrama a bloques de la ecuación de balance de masa

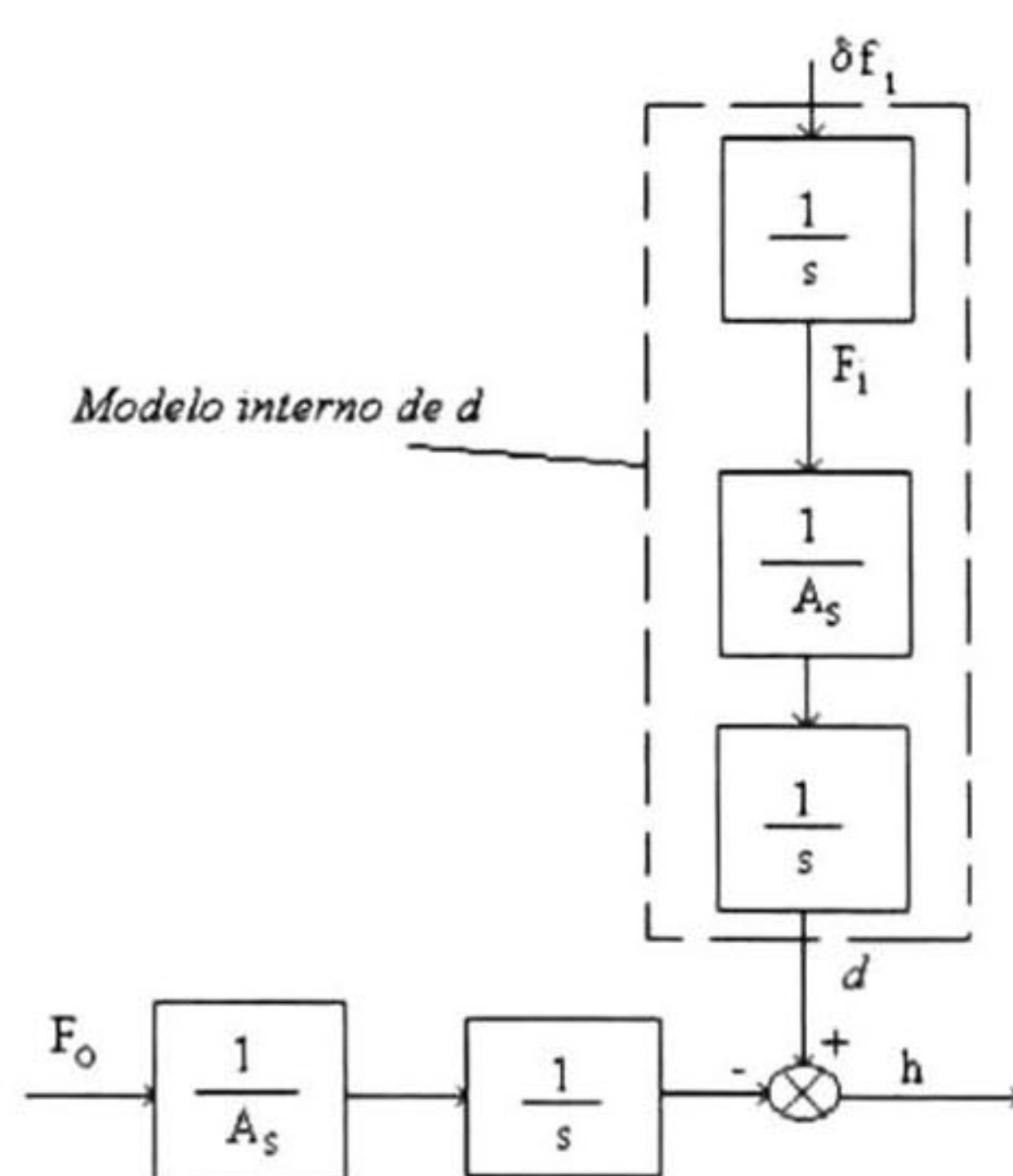


Figura E.2: Diagrama a bloques equivalente de la ecuación de balance de masa



**CENTRO DE INVESTIGACION Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL IPN
UNIDAD GUADALAJARA**

El jurado designado por el Laboratorio de Ingeniería Eléctrica y Ciencias de la Computación del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, aprueba la tesis que presenta para su examen final de Maestría en Ciencias en la Especialidad de Ingeniería Eléctrica, Carlos Alberto Hernández Ramírez, el día 16 de Diciembre de 1997.

Dr. Edgar N. Sánchez Camperos

Dr. Bernardino Castillo Toledo

Dra. Ofelia Begovich Mendoza

Dr. Arturo Sánchez Carmona

Dr. Antonio Ramírez Treviño



CINVESTAV
BIBLIOTECA CENTRAL



SSIT000003811