

1 1981

CONTROL Y ESTIMACION OPTIMA DE REACTORES NUCLEARES
UTILIZANDO UN FILTRO DE KALMAN AUTOADAPTIVO^{+/}

Ing. R. A. Haran[#]

Centro Atómico Bariloche^{*} - Instituto Balseiro^{**}
8400 S. C. de Bariloche

El fin de este trabajo es realizar control multivariable óptimo estocástico de un reactor nuclear usando la técnica de los filtros de Kalman.

Como dentro de las facilidades con que se dispondrán para la enseñanza e investigación en la carrera de Ingeniería Nuclear del Instituto Balseiro, se cuenta con el reactor de experimentación RA-6, actualmente en construcción, este se usará, entre otras tareas, para la enseñanza e investigación de control "on line" de reactores.

Para lograr este objetivo se ha encarado la solución de cuatro etapas principales que son:

- 1) Implementación de un filtro de Kalman;
- 2) Desarrollo de los algoritmos para la determinación de las matrices de covariancia(filtro autoadaptivo);
- 3) Determinación de la ley de control;
- 4) Simulación en la computadora del mismo.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos y los métodos utilizados en la realización de los puntos 1, 2, y 4 anteriormente mencionados

El diagrama de bloques del sistema estudiado se puede observar en la figura

^{+/} Auspiciado por el programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Proyecto ARG/78/020

[#] Investigador Independiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

^{*} Comisión Nacional de Energía Atómica

^{**} Universidad Nacional de Cuyo

Relaciones Básicas

La dinámica del reactor está descripta por las ecuaciones:

$$\begin{aligned}\dot{D}_i &= -\lambda_i D_i + \frac{\beta_i}{\ell^*} \phi \quad i=1, \dots, 6 \\ \dot{\tau}_f &= h_f (\tau_f - \tau_m) + b_1 \phi \\ \dot{\tau}_m &= g_m \tau_m + g_f \tau_f + b_2 \phi\end{aligned}$$

donde D_i y ϕ son la concentración del precursor i y la potencia media del reactor

τ_f diferencia entre la temperatura media del combustible T_f y la aprox. constante temperatura de entrada del moderador T_i

τ_m diferencia entre la temperatura media del moderador T_m y la aprox. constante temperatura de entrada del moderador T_i

$$\tau_f = T_f - T_i$$

$$\tau_m = T_m - T_i$$

se calcula de acuerdo a la aproximación prompt-jump y es

$$\phi = \frac{\ell^* / \beta}{\ell - \rho} \sum_{i=1}^6 \lambda_i D_i \approx \frac{\ell^*}{\beta - \rho} \sum_{i=1}^6 \lambda_i D_i$$

ρ : reactividad en dolares en el nucleo y se determina por

$$\rho = \rho_a + \alpha_f T_f + \alpha_m T_m$$

ρ_a reactividad en \$ de la porción de la barra de control insertada en el nucleo

α_f, α_m coeficientes de realimentación de la reactividad \$/C, se suponen constantes a determinar.

Las variables medidas son ϕ y $\tau_0 \equiv (T_0 - T_i)_{\text{mod.}}$

Para el reactor tipo piscina que tomaremos de ejemplo es:

$$\tau_0 = 3 \tau_m$$

ademas, como α_f y α_m son constantes

$$\dot{\alpha}_f = \dot{\alpha}_m = 0$$

El filtro de Kalman se utiliza para estimar D_i, τ_f, τ_m e identificar α_f y α_m , teniendo como entrada ρ_a y como variables medidas (contaminadas con ruido) ϕ y τ_0 .

Usando variable de estado las ecuaciones del sistema son:

$$X_{k+1} = \phi X_k + Du_k + \Gamma w_k$$

$$Y_k = H X_k$$

Diseño de un filtro de Kalman discreto autoadaptivo

A los efectos del presente estudio se implementaron dos tipos diferentes de estimadores.

1er. tipo: se uso un filtro de Kalman discreto como el descrito en la referencia {1}

2do. tipo: se uso un filtro de Kalman no-recursivo como el descrito en la referencia {2}

Para estos dos casos se ha implementado un filtro autoadaptivo (siguiendo el procedimiento recomendado por R. Mehra ref{3}) con el cual se ajustan los valores de la covariancia del ruido tanto del sistema (Q) como de la medición (R).

El método (que se describe en detalle en las referencias 2 y 3) consta de:

a) realizar la estimación de los parámetros $\hat{C}_k$ por medio de:

$$\hat{C}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=k}^N y_i y_{i-k}^T \quad k=0,1,\dots,n$$

b) identificar R usando:

$$\hat{A} - H\phi^{-1}r\hat{S} = \hat{C}_0 - H\Lambda$$

c) identificar Q con:

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^{k-1} H\phi^j r \hat{Q} r^T (\phi^{j-k})^T H^T + \hat{S}^T r^T (\phi^{-k-1})^T H^T - H\phi^{k-1} r \hat{S} = \\ = \Lambda^T (\phi^{-k})^T H^T - H\phi^k \Lambda - \sum_{j=0}^{k-1} H\phi^j \Omega (\phi^{j-k})^T H^T \end{aligned}$$

cuyo significado esta detallado en las referencias ya mencionadas.

Resultados Obtenidos

Estos estimadores han sido probados con distintos sistemas de ecuaciones mostrando un comportamiento satisfactorio.

Aqui se presentan los resultados obtenidos usando como ejemplo el reactor tipo piscina de Lynchburg (referencia {4})

Las matrices, que se obtuvieron usando un Δt de discretización de .2 segundos son las siguientes:

$$\phi = \begin{bmatrix} .707 & .2306 \\ .02414 & .6031 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 9.541 \text{ E-3} \\ 1.966 \text{ E-4} \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$r = \begin{bmatrix} -9.541 \text{ E-3} \\ -1.966 \text{ E-4} \end{bmatrix}$$

Los valores estimados de $\hat{Q}$, $\hat{R}$, $\hat{S}$ son:

$$Q = 2099.33$$

$$R = .00028$$

$$\hat{S} = -.5789$$

Se presentan los resultados obtenidos usando el plotter digital de la computadora del centro de cómputos del CAS, en donde se realizó la simulación.

Se pueden ver las estimaciones de $\hat{\sigma}_t$ y $\hat{\sigma}_m$ para los dos tipos de filtros mencionados.

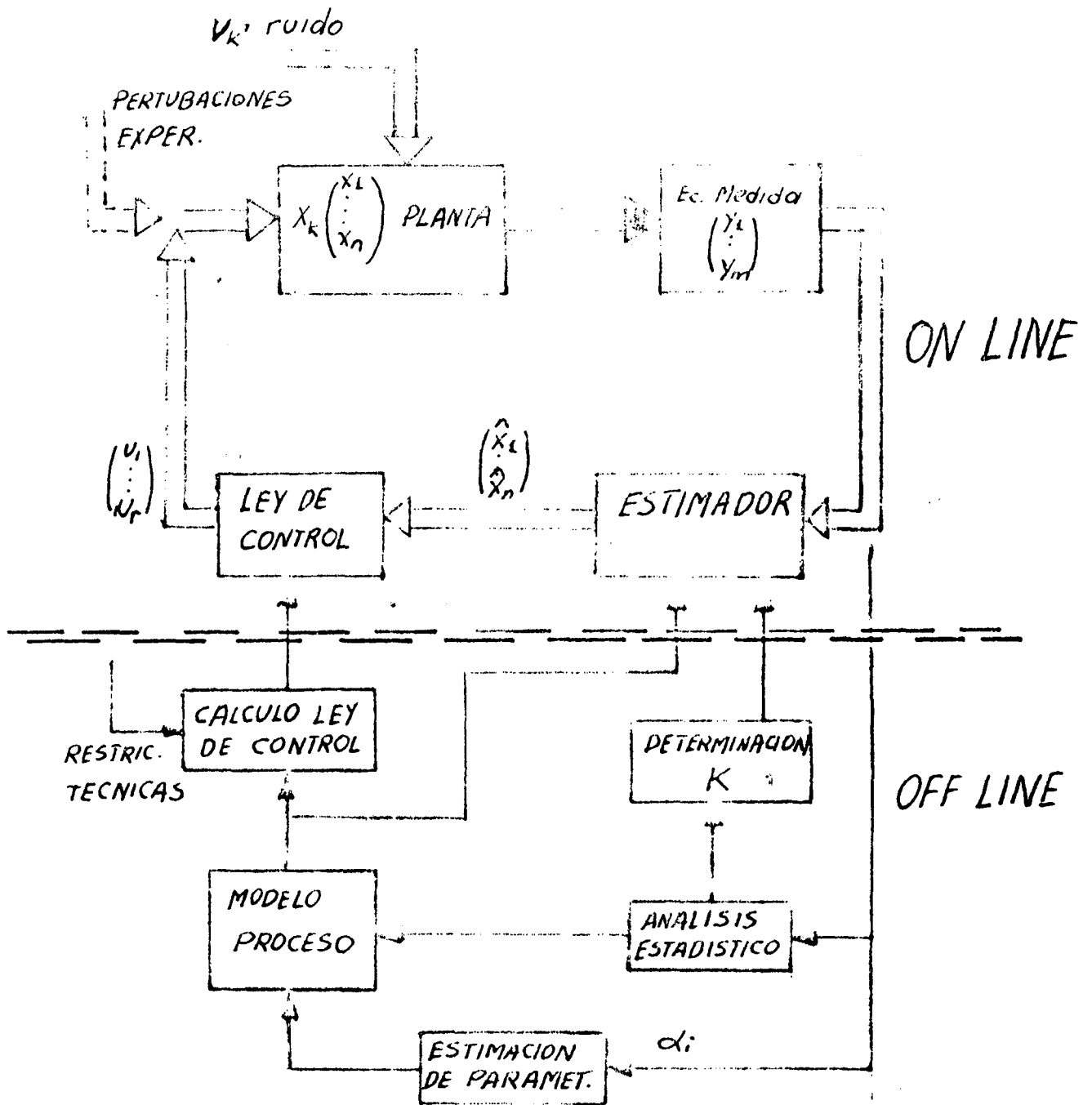
Se puede observar una buena concordancia entre ellos.

Debido al intervalo de discretización usado, estos gráficos indican la envolvente de $\hat{\sigma}_t$ y $\hat{\sigma}_m$.

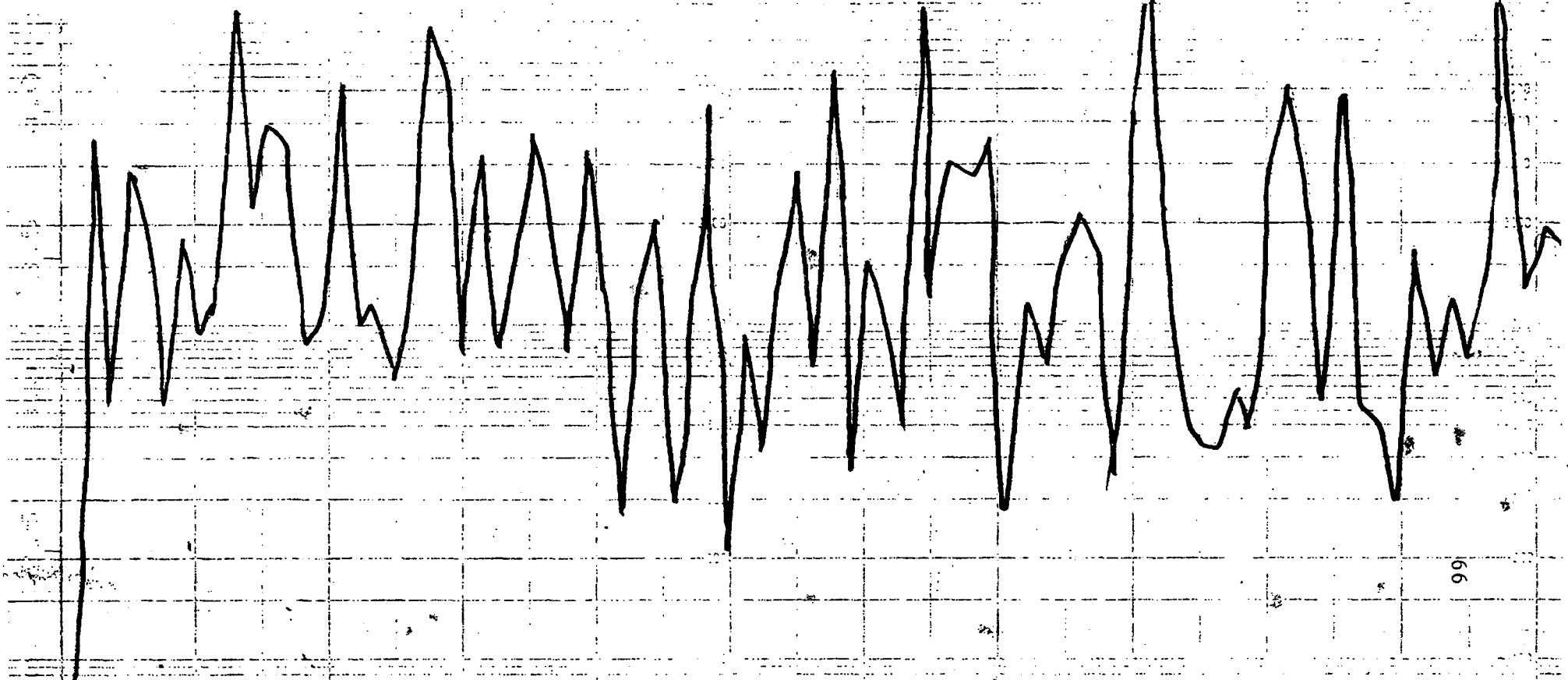
Además, y probablemente a errores en el modelo que representa al sistema, los gráficos presentan un grado de dispersión mayor que el deseado.

Referencias

- 1) A.H.Jazwinski, Stochastic Processes and Filtering Theory, Academic Press, 1970
- 2) R.A.Haran, Implementation of an Adaptive Kalman Filter, IB'552-77/2 DFVLR, F.R.G.
- 3) R.K.Mehra, On the Identification of Variances and Adaptive Kalman Filter, IEEE Automatic Control, April 1970
- 4) S.S.Godbole, Application of Kalman Filtering Technique to Nuclear Reactors, IEEE Nuclear Sciences, Feb. 1973



ESQUEMA DE CONTROL

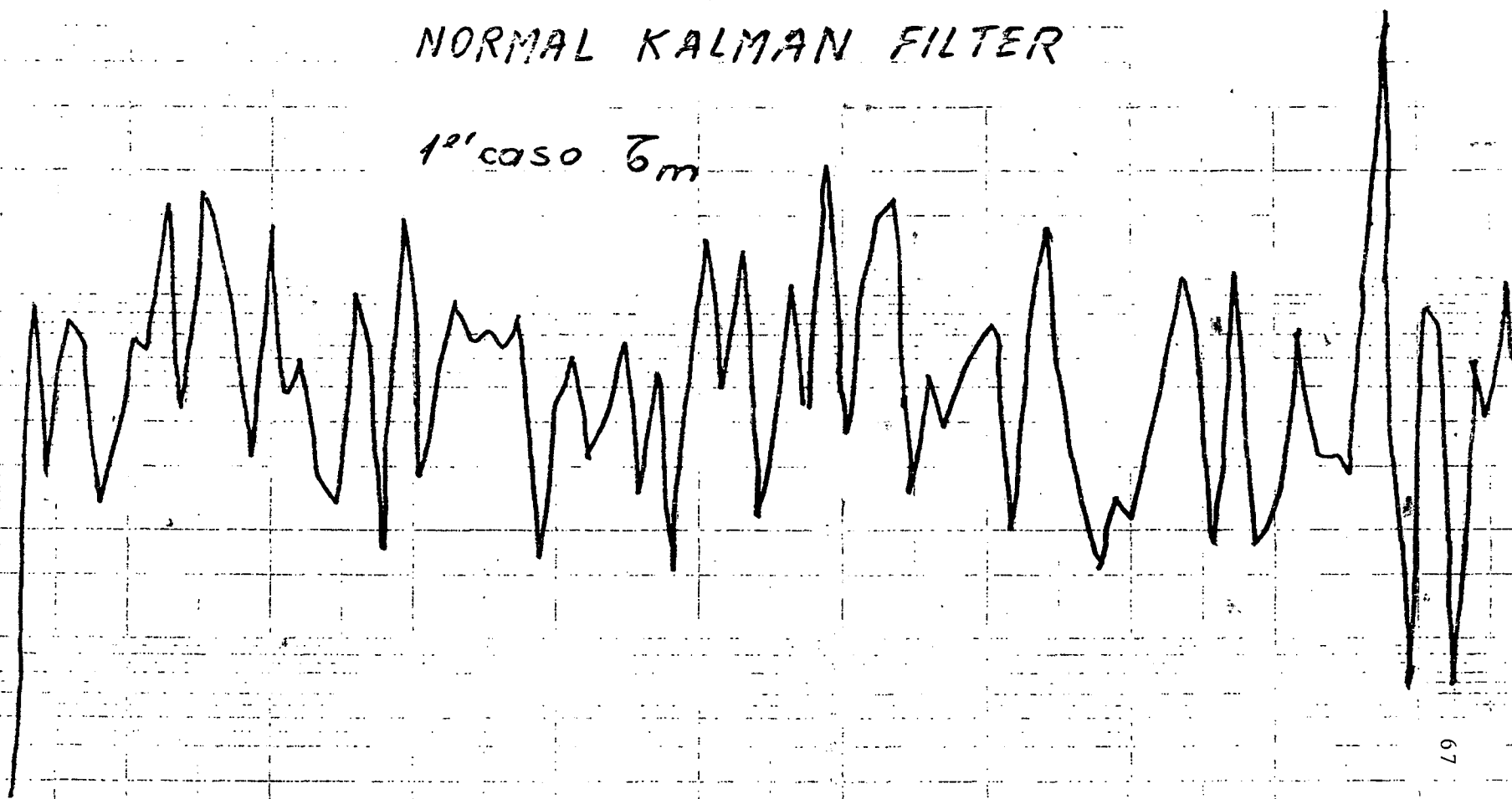


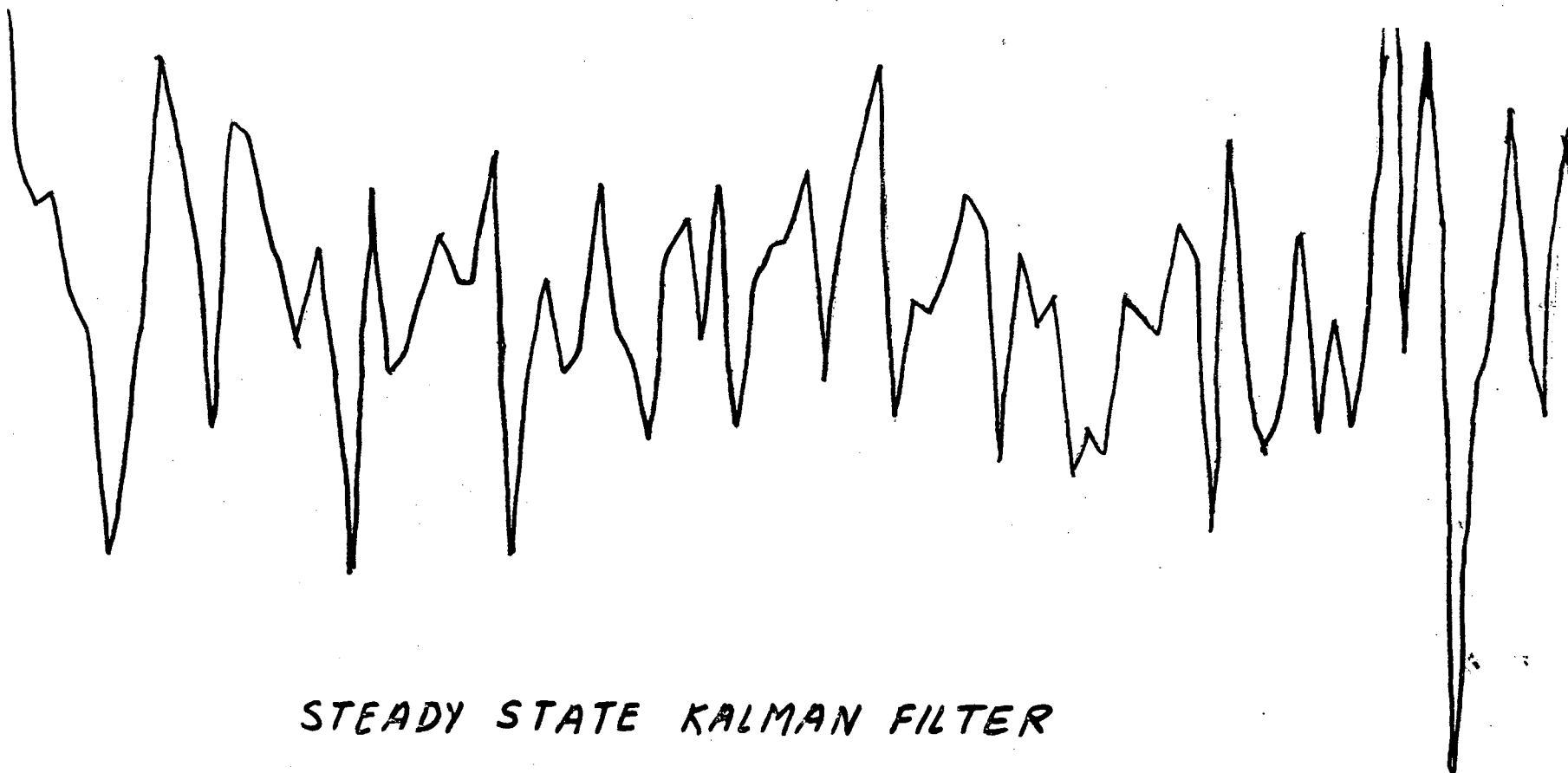
NORMAL KALMAN FILTER

1º caso σ_f

NORMAL KALMAN FILTER

1^o caso τ_m





STEADY STATE KALMAN FILTER

1° caso $\bar{z}_f$

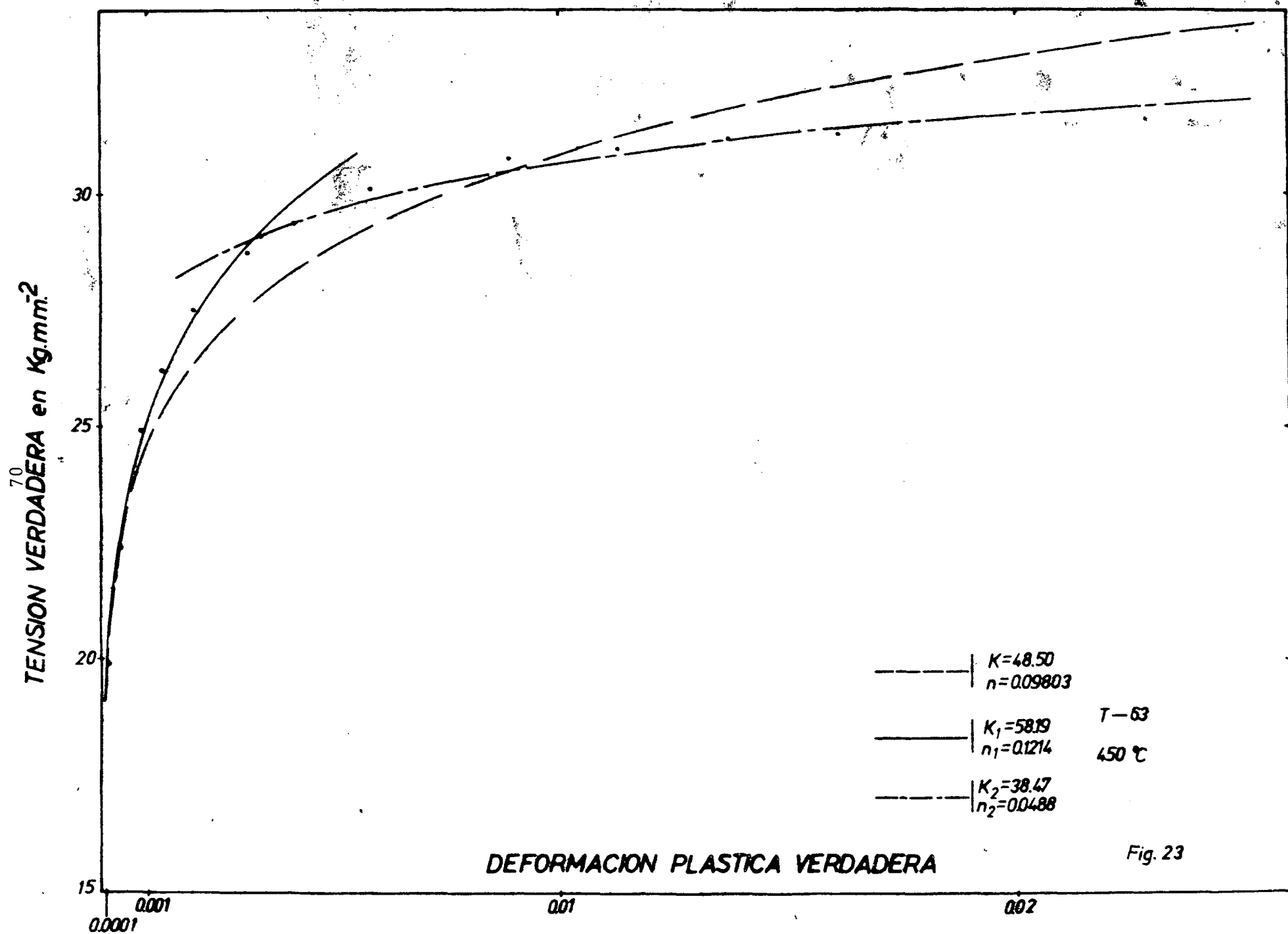


Fig. 23

STEADY STATE KALMAN FILTER

1^{er} caso $\mathcal{E}_m$

