

|         |                |
|---------|----------------|
| C.N.I.  | Biblioteca     |
| ARCHIVO | COMUNICACIONES |
| NO<br>1 | AÑO<br>1983    |

08.83.02

CNEA-AC 8/83

REPUBLICA ARGENTINA  
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA  
Dependiente de la Presidencia de la Nación  
CENTRAL NUCLEAR EN ATUCHA

MEDICION DE FLUJO NEUTRONICO  
INSTRUMENTACION DENTRO Y FUERA DEL NUCLEO

Prof. Ing. Humberto MAZZAFERRI

Reimpresión  
Buenos Aires  
1983

La medición de flujo neutrónico tiene por objeto vigilar la potencia del reactor y la distribución espacial del flujo neutrónico dentro del núcleo. Podemos dividirla en 2 partes:

- a) Instrumentación fuera del núcleo, y
- b) Instrumentación dentro del núcleo.

a) Instrumentación fuera del núcleo (los detectores están fuera del núcleo)

Puede ser dividida a su vez en:

- a<sub>1</sub>) Instrumentación normal, y
- a<sub>2</sub>) Instrumentación especial.

a<sub>1</sub>) Instrumentación normal

El rango total (10 décadas) de lectura de esta instrumentación se cubre con tres tipos de cadenas de medición:

- 1) Canal de impulsos (2 cadenas)
- 2) Canal de intervalo medio (3 cadenas logarítmicas y 1 lineal)
- 3) Canal de intervalo de potencia (4 cadenas).

Los detectores de las distintas cadenas están alojados en cabezales especiales colocados en tubos de acero, y repartidos en forma uniforme en la periferia del recipiente de presión -tratan que los cabezales correspondientes al mismo tipo de cadenas estén ubiados en forma simétrica al eje Z del reactor y lo más cerca posible del recipiente de presión.

Los tubos guía tienen salida en cajas de conexiones en el nivel (16 metros).

Con el fin de evitar interferencias y/o perturbaciones se han tenido precauciones especiales en las interconexiones entre los detectores y el resto de la instrumentación, pues las señales en este caso no son como las sistemas convencionales (0-20 mA), sino mucho más débiles (pueden llegar a  $10^{-10}$  A en cc, y en el caso de las cadenas de impulsos, son pulsos que llegan a tener una frecuencia de  $10^6$  pps).

Por ello, los cables de transmisión de señal son de alta aislación, y además son alojados (junto con los que llevan las tensiones de alimentación para los detectores) dentro de caños de cobre aislados de tierra en todo su recorrido, excepto en un solo punto, que es el blindaje de acero (la esfera).

Todos los módulos que componen las cadenas de instrumentación de  $\phi_N$  tanto de la instrumentación normal como de la especial y dentro del mueble, hasta la obtención de la señal "flujo neutrónico" y "período" son del tipo Simatic N y se encuentran en los armarios JN, ubicados en la "Sala de medición de  $\phi$  neutrónico" frente a la sala de comando.

Además los módulos de las cadenas redundantes están ubicados por razones de seguridad en distintos armarios y el cableado se hace a través de diferentes caminos.

#### Detectores utilizados en la instrumentación normal

En los canales de impulsos se usan tubos de trifleruro de Boro.

En los canales de intervalo medio se usan cámaras de ionización compensadas.

En los canales de intervalo de potencia se usan cámaras de ionización no compensadas.

#### Canal de impulsos o de arranque (hay 2 canales idénticos YX02X01-YX02X02)

El detector es un tubo proporcional muy sensible; asociado con el mismo hay un preamplificador, constituyendo el conjunto un tren articulado que permite subir o bajar los detectores. Ese tren puede ser subido o bajado por medio de un motor con terne que está a la salida de los tubos guía, con una caja de comando portátil.

El motor tiene protecciones contra culpa máxima y mínima y contactos de inicio y fin de carrera. Además, solidario al eje del mismo hay un potenciómetro que por variación de resistencia (al girar el motor) da la profundidad a que está sumergido el cabezal en el tubo guía.

El objeto de este sistema es evitar, una vez producido el arranque, que los detectores se quemen por el alto flujo. Luego, cuando se ha producido el primer arranque, se levanta el cabezal a una posición de "guarda" o "espera" en la cual el flujo no los destruya, y no se vuelve a utilizar en arranques posteriores, excepto en el caso en que la parada previa al arranque sea mayor de 6 meses (en los otros casos los canales intermedios sirven para arrancar).

### Medición de nivel de flujo neutrónico y período

Si de alguna forma se produce una variación de reactividad tipo escalón, el flujo de neutrones varía exponencialmente.

Por lo tanto,

$$\phi = \phi_0 e^{\pm t/T} \quad \text{donde } T = \frac{\lambda}{\rho} = \text{Período} = \text{tiempo que tarda el flujo en variar hasta } \phi_0 \text{ ó } \phi_0/e.$$

$\lambda$  = tiempo de vida de una generación de neutrones.

$\rho$  = variación de reactividad.

Además el número de pulsos es proporcional a  $\phi$ :

$$n(\text{pps}) = \phi = \phi_0 e^{\pm t/T}$$

$$i = \ln n = \ln \phi = \ln \phi_0 + t/T \longrightarrow i \propto t/T \quad (\text{o sea que la corriente varía linealmente con el tiempo}).$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{d(\ln \phi)}{dt} = \frac{1}{\phi} \frac{d\phi}{dt} = \frac{\pm 1}{\phi_0 e^{\pm t/T}} \phi_0 \frac{1}{T} e^{\pm t/T} = \pm \frac{1}{T}$$

Por lo tanto, una forma de medir el período es sacar la derivada del  $\ln \phi$ . Además, para medir el nivel de flujo neutrónico  $\phi$  conviene usar un elemento de transferencia logarítmica para poder cubrir las 6 décadas con instrumentos convencionales.

Esquema de la instrumentación para obtener las señales de nivel  $\phi$  y período (ver figura 1)

Los pulsos que salen del detector son amplificados en el preamplificador asociado al mismo, luego son conducidos desde el lugar de detección hasta la sala de medición de flujo neutrónico por los cables especiales encerrados en tubos de cobre. Ahí entran a un amplificador que les da una altura conveniente para efectuar la discriminación. Luego pasan a la unidad R que hace la discriminación en altura, las conforma y las cuenta dando una tensión de salida que es proporcional al logaritmo del número de pulsos por unidad de tiempo que entra a la unidad (esa unidad la podemos llamar medidor de velocidad de conteo) y luego, a través de un amplificador separador sale la señal "la  $\phi$ ".

Además, se toma la salida de "R" y se la hace pasar por un diferenciador para obtener  $1/T$ .

La fuente de alta tensión que polariza el detector está también ubicada en los armarios JN, y posee un vigilador de Alta Tensión que indica cuándo la fuente se ha corrido con respecto al valor ajustado.

Elaboración posterior de las señales de los canales de impulsos (ver figura 2)

Las señales de ambos canales YX02X01 y YX02X02, van a sendos fequites en el tablero de protección. Luego pasan por un transductor corriente tensión y van a un selector de máximo del que sale la mayor. Esa señal va a un instrumento en el pupitre, a la computadora y a un registrador en la sala de control.

Además, antes del maximizador se derivan señales que van a los dadores de límite, el de  $\phi$  mínimo y el de  $\phi$  máximo.

Cuando el dador de límite de  $\phi$  mínimo actúa (o sea que  $\phi$  es menor que  $\phi$  mínimo) da órdenes de "parar subida de barras", prende un fequite en el tablero de protecciones y en el módulo, y además produce RESA.

Pero mediante una llave en el pupitre se puede desbloquear este dador de límite inhibiendo la señal de RESA y habilitando la subida de barras.

El dador de límite de  $\phi$  máximo produce RESA y va a Simatie. Mediante pulsadores se pueden probar los fequites.

Los dadores de límite de los dos canales van a un sistema 1 de 2, de manera que cualquiera de los dos que actúen produce las acciones señaladas. Los dadores de límite de  $\phi$  máximo son punteados cuando hay señal de  $\phi$  mínimo en los canales intermedios, que además desconectan los canales de impulsos.

#### B) Período (ver figura 3)

Nuevamente la indicación en sala de control es el máximo de los canales.

Los dadores de límite de período demasiado corto producen Alarma y paran la subida de barras.

#### Canal de Intervalo Medio

##### Obtención de la señal de flujo y período (ver figura 4)

Estos canales cubren el rango desde  $10^{-7}$  de  $P_n$  hasta  $P_n$ . En estos canales los detectores son cámaras de ionización compensadas, por lo tanto llevarán dos fuentes de alimentación de alta tensión.

Como ahora lo que se mide es corriente, se usa un amplificador logarítmico para obtener la señal " $\ln \phi$ " y luego esta señal es derivada para obtener la inversa del período " $1/T$ ".

##### Cadena de Intervalo Medio Logarítmico (Nivel de $\phi$ neutrónico) (Ver figura 5).

En este esquema se indica un solo canal medio. Cada canal posee tres dadores de límite, pero éstos efectúan la acción a través de un sistema 2 de 3. De manera que por ejemplo la acción RESA se ejecutará cuando dos de los tres dadores de límite (de RESA) estén actuados. Si solo uno de ellos actúa, la acción no se prevoca pero apa-

rece la indicación en sala de control.

Además la señal de estos canales se utiliza en la regulación de arranque del reactor; entonces se usa la mayor de ellas por razones de seguridad, pero antes se comparan entre sí las tres señales y se elimina aquélla que difiere de las otras dos en más que lo prefijado en los comparadores.

#### Canal Medio Lineal (ver figura 6)

Este canal da una medida más exacta del flujo neutrónico en el rango medio. Como es lineal y el rango a cubrir es de 7 décadas, hay un cambiador de escalas en el pupitre que permite leer con precisión en cada década.

Además, el detector de este canal posee una salida que va a la sala de comando para conectar el reactímetro.

#### Canal de Potencia

Estos canales miden desde el 1% de potencia neutrónica hasta el 120% de potencia neutrónica.

#### Elaboración de la señal de nivel de flujo neutrónico (ver figura 7)

Los detectores son en este caso cámaras de ionización no compensadas. La señal de los mismos (corriente) luego de pasar por un amplificador lineal, pasa para su elaboración posterior a los armarios JK. En este caso no hay medición de período directa.

#### Elaboración posterior de la señal

##### Corrección por Potencia térmica

En este rango es importante tener una lectura que sea representativa de la potencia del reactor. Habíamos dicho que las cámaras tenían Boro y que los neutrones reaccionaban con el Boro produciendo un  $\alpha$  y Li, por consiguiente la cantidad de boro que hay en las cámaras va disminuyendo con el tiempo, y entonces éstas "se queman" o

"envejecen", o sea que su indicación decrece a lo largo del tiempo; además la posición de barras modifica la distribución espacial de  $\phi$ , y por consiguiente la lectura de las cámaras dependerá de la posición de barras. (ver figuras 8 y 9)

$\phi_N$  es el flujo medio verdadero y  $\phi_M$  el flujo que miden las cámaras. Se ve que  $\phi_M$  sigue las variaciones rápidas de  $\phi_N$  pero no las lentas.

En esta figura<sup>(9)</sup> se ve cómo varía la indicación de potencia térmica para variaciones de flujo. Surge que la potencia térmica (temperatura) responde bien a las variaciones lentas de  $\phi_N$ , pero no acusa las variaciones rápidas del mismo.

De ambas figuras surge claramente que si se toma una combinación de las señales Pt y  $\phi_M$  de manera que la señal resultante tenga las variaciones lentas (eliminadas las rápidas) de Pt más las rápidas de  $\phi_M$  (eliminadas las lentas), se puede obtener la variación de  $\phi_N$ .

Entonces, lo que se hace es tomar la señal de temperatura y hacerla pasar por un circuito pasabajos, obteniéndose a la salida las variaciones más lentas de Pt (el valor medio) y además se toma la señal de  $\phi_M$  y se le eliminan los componentes de baja frecuencia (pasaltos) y luego se suman ambas, obteniéndose como resultado el flujo neutrónico "corregido" o "calibrado" " $\phi_{MC}$ ".

#### Valor límite deslizante

Este "valor límite deslizante" VLD, hace que en el lazo de regulación de potencia se limiten las velocidades de crecimiento y decrecimiento del valor deseado (setpoint) a un máximo.

Además habíamos dicho que en este intervalo no había medición directa de período, pero constituyendo el valor límite deslizante "VLD", y comparando el flujo medido corregido con el VLD, se tiene una señal de alarma primero y una señal de RESA por excesiva velocidad de crecimiento de potencia del reactor.

Es un valor que tiene en cuenta la historia de la variación de potencia ( $\phi_{MC}$ ) y hace que si esa velocidad aumenta por encima de la que tenía unos momentos antes, se prolonga la alarma y luego el Seram (RESA).

Se le construye de la siguiente forma (ver figura 10).

Se retarda el valor de  $\phi_{MC}$  en un cierto tiempo (mediante un integrador), luego se le suma un valor constante (20% Pn). Ese valor así obtenido es el "techo" que el  $\phi_{MC}$  puede alcanzar sin provocar la acción de RESA.

En realidad, antes de alcanzar el "techo" de RESA, está el "techo" de alarma que es la señal  $\phi_{MOR} + 15\%$ .

Supongamos que el  $\phi_{MC}$  esté subiendo con una velocidad menor que la máxima admisible y en el instante  $t_0$  (ver figura 11), por alguna causa aumenta su velocidad de crecimiento.

Como el VLD está retardado con respecto al  $\phi_{MC}$ , sigue creciendo con la velocidad de crecimiento que tenía el  $\phi_{MC}$  un momento antes, entonces el  $\phi_{MC}$  alcanza primero al VLD-5% Pn en el instante, produciendo una alarma, y si no se ejecutan las acciones necesarias para bajar la velocidad de crecimiento alcanza un  $t_2$  el VLD, produciéndose la acción de RESA.

#### Elaboración posterior de la señal del canal de Potencia (ver figura 12)

El  $\phi_M$  (corriente) pasa a través de una transimpedancia, transformándose en tensión. Las señales de  $\phi_M$  (tensión) de los 4 canales se comparan entre sí para desconectar el canal erróneo. La señal de  $\phi_{MC}$  pasa luego por el corrector de carga térmica, obteniéndose el  $\phi_{MC}$ . Los  $\phi_{MC}$  de los 4 canales se vuelven a comparar entre sí para efectuar la desconexión (para el caso en que haya fallas en el circuito corrector).

El  $\phi_{MC}$  entra al circuito constructor del VLD, cuya salida se compara con las de los otros canales y por último pasa por el circuito que genera la señal VLD - 5% de Pn, señal que se usa para la limitación del valor deseado.

Además las señales de  $\phi_{MO}$  van a un promediador de donde sale la señal promedio de  $\phi_{MO}$  que constituye el valor medido.

La señal de  $\phi_{MO}$  va a los siguientes dadores de límite:

- $\phi$  mínimo: su acción es el puenteado de las órdenes de RESA de nivel y período de los canales medios (lógica 2 v 3)
- $\phi$  50%: cuando actúa produce RESA si está funcionando un solo lazo del reactor (lógica 2 v 4).
- $\phi$  máximo: produce RESA cuando la potencia del reactor sobrepasa el 115% de  $P_n$  (lógica 2 v 4).
- $\phi$  VLD: produce RESA (lógica 2 v 4).
- $\phi$  VLD-5% $P_n$ : produce alarma (lógica 2 v 4).

## a<sub>2</sub> Instrumentación especial (ver figura 13)

Durante las etapas en potencia 0 es necesario medir el flujo neutrónico integrado a lo largo del eje Z del reactor. Para ello se ha colocado un tubo en el aislamiento térmico del recipiente del reactor. Dentro del mismo se han colocado 5 cámaras de ionización compensadas distribuidas a lo largo del tubo. Las salidas de estas cámaras se conectan en paralelo y la señal resultante se envía al reactivómetro con el que se hacen las mediciones.

## Simulador (ver figura 14)

Este equipo es también modular y está ubicado en los armarios JN en la sala de medición de flujo neutrónico. Mediante el mismo pueden simularse las señales que vienen de los detectores que están fuera y dentro del núcleo, y de esa forma comprobar el correcto funcionamiento de la instrumentación que elabora las señales de flujo y período.

Mediante el mismo se generan las siguientes señales:

- 1) Pulsos de frecuencia fija seleccionable (nivel en canal de pulsos).
- 2) Pulsos de frecuencia variable exponencialmente con el tiempo (período en el canal de pulsos).
- 3) Corriente fija seleccionable (nivel en canal medio, de potencia, y dentro del núcleo).
- 4) Corriente variable exponencialmente (período en el canal medio).

En la unidad de comando del simulador se selecciona el canal que se desea probar. (No se puede seleccionar más de uno por vez).

Al seleccionar un canal se desconecta, mediante un sistema automático de relés la entrada del amplificador correspondiente de la del detector y se conecta la salida del simulador al mismo.

#### b) Medición de flujo neutrónico dentro del núcleo

El objeto de esta medición es obtener la distribución espacial del flujo dentro del reactor con el fin de programar el movimiento de barras para atenuar las oscilaciones de potencia debidas al Xenón. Con ese fin se han colocado 48 detectores distribuidos dentro del núcleo de manera de obtener igual número de valores de flujo mediante los cuales extrapolando se puede obtener la distribución espacial del mismo.

Estos detectores (ver figura 15) se han distribuido en 6 lanzas que tienen 7 detectores c/u y 2 lanzas con 3 detectores.

Resulta claro que dichos detectores deben ser lo más pequeños posible y deben tener un porcentaje de quemado bajo. Por ello, se han adoptado los detectores de tipo autopropulsados. (Se los denomina autopropulsados o autopolarizados pues no necesitan señal de polarización).

Constan (ver figura 16) de un emisor y un colector con un aislante entre ambos; el material del emisor puede ser de distintos tipos, como ser vanadio, platino, cobalto, rhodio, etc. En este caso se eligió vanadio, pues combina buena sensibilidad con bajo porcentaje de quemado, aunque tiene el problema de que su retardo es relativamente grande.

El funcionamiento del detector es el siguiente:

Los neutrones al chocar con el emisor producen una reacción nuclear cuyo resultado es la liberación de electrones, algunos de los cuales alcanzan el colector, produciendo en consecuencia una corriente. En la reacción nuclear se producen electrones inmediatos y electrones mediatos; luego, si hay un escalón de flujo, la señal de salida (corriente) será un pequeño escalón seguido de una exponencial que llega al cabo de un cierto tiempo, al valor final proporcional al escalón.

de flujo neutrónico.

Como la constante de tiempo de la exponencial es del orden de los 3,75 minutos se obtendría el valor del salto recién después de como mínimo ese tiempo; en consecuencia, para obtener una lectura rápida a la salida del amplificador de señal del detector, se coloca un circuito corrector de manera de regenerar el escalón.

La reacción que arranca electrones del emisor los arranca también en el cable que atraviesa zonas en que hay flujo, por consiguiente, la señal que se obtiene es en realidad la suma de las señales que producen el detector y el cable. Para evitar esto, se agrega un nuevo cable denominado "de compensación", y luego se resta la señal que viene del cable de compensación de la que viene del emisor, obteniéndose como resultado sólo la señal que proviene del emisor. Esta compensación en Atucha no se efectúa.

#### Elaboración de la señal (ver figura 17 )

La señal proveniente del detector pasa por un amplificador, y luego va al corrector de donde sale el flujo neutrónico corregido " $\phi_{NC}$ ". Estas señales pasan a la computadora, algunas de ellas van además al comando de barras. Además, en la sala de comando existen 16 instrumentos en los que se pueden leer los valores individuales de cada detector de las distintas sondas (seleccionando con una llave la sonda), los valores medios de cada sonda y los valores máximos de cada plano; además hay un registrador que registra el máximo absoluto de todos los planos.

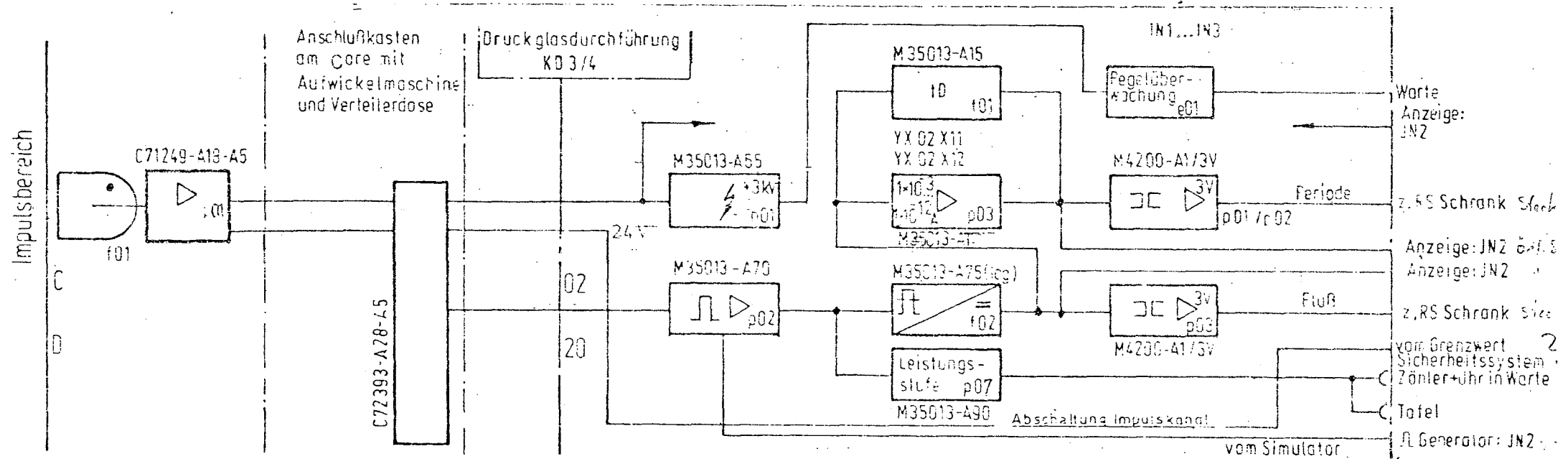


Figura 1

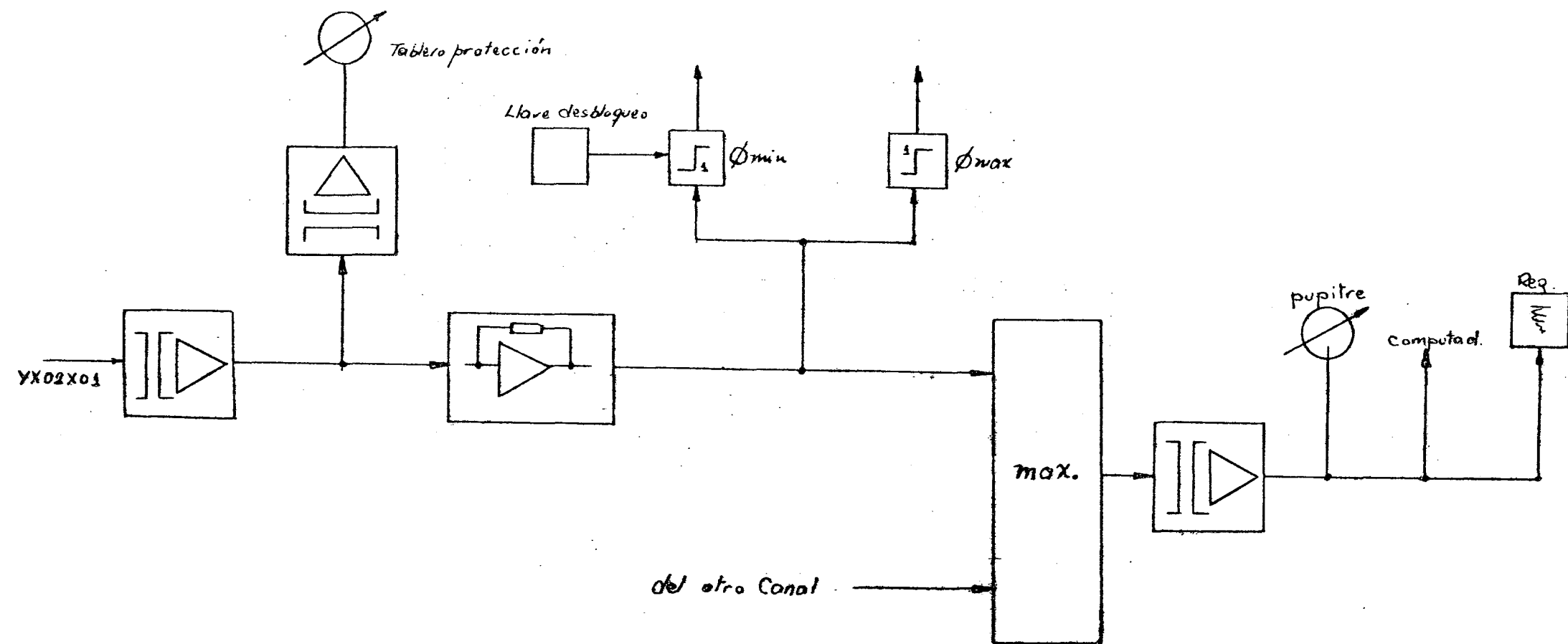


figura 2

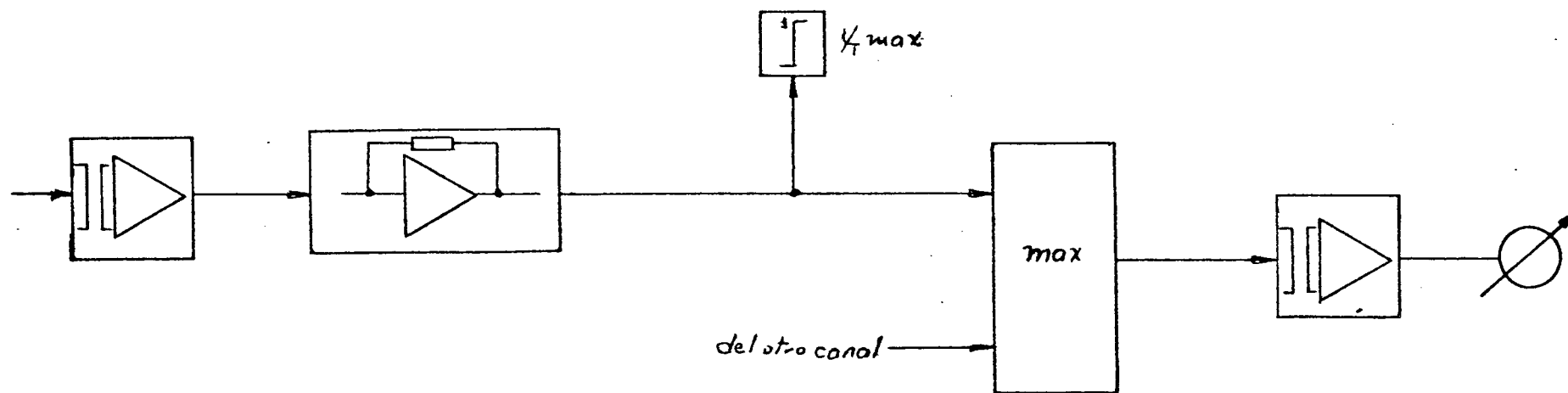


figura 3

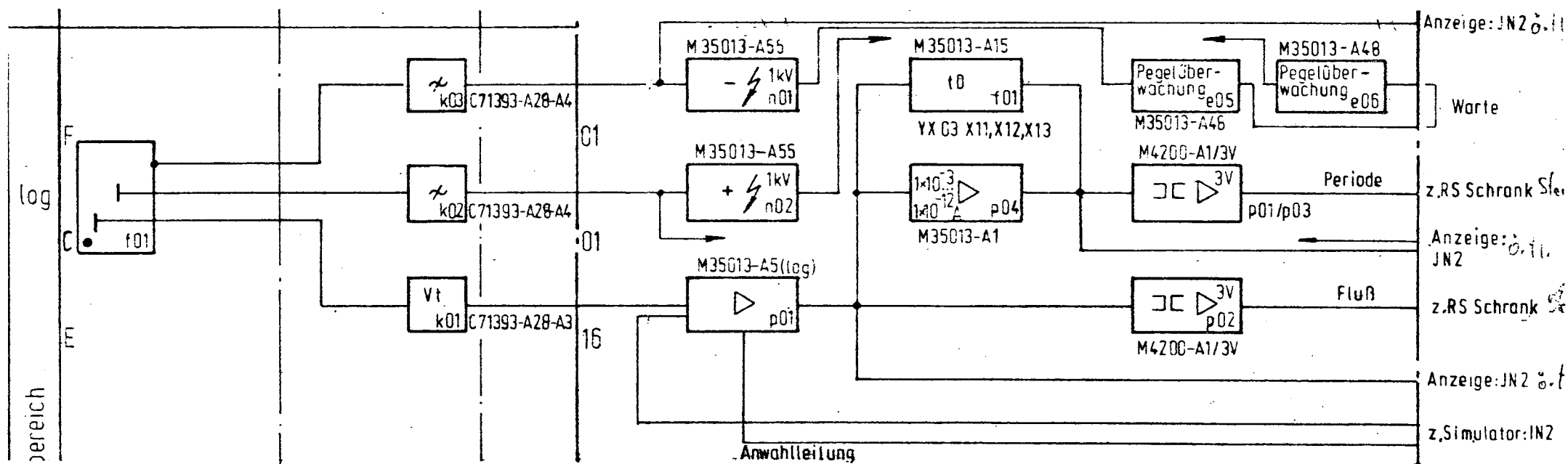


figura 4

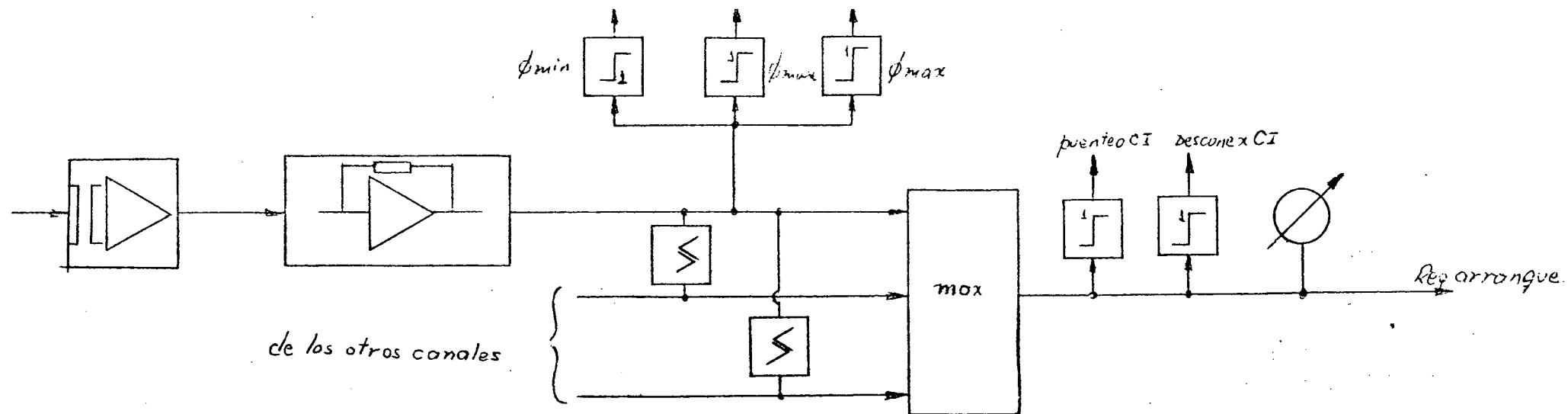


Figura 5

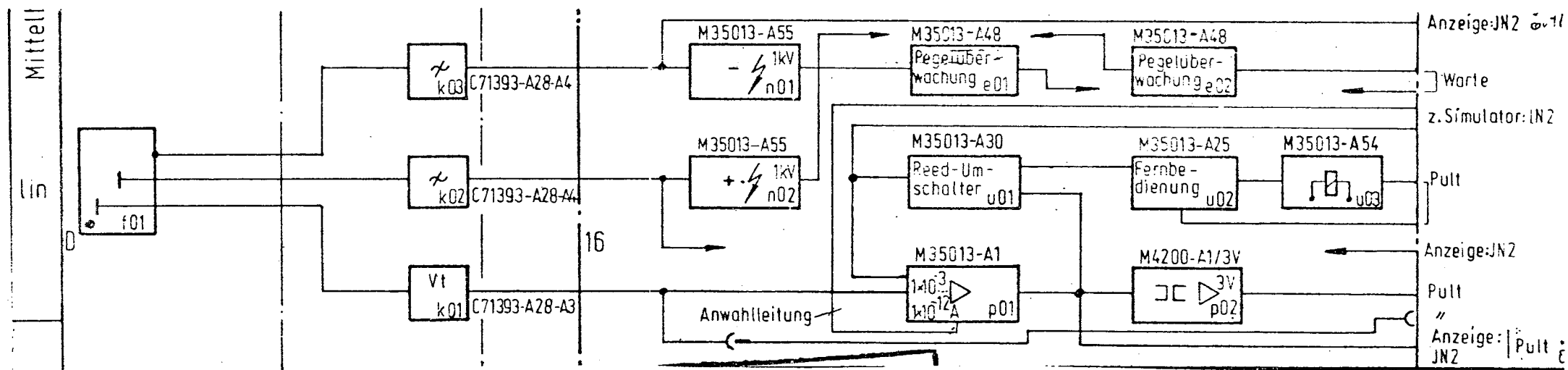


Figura 6

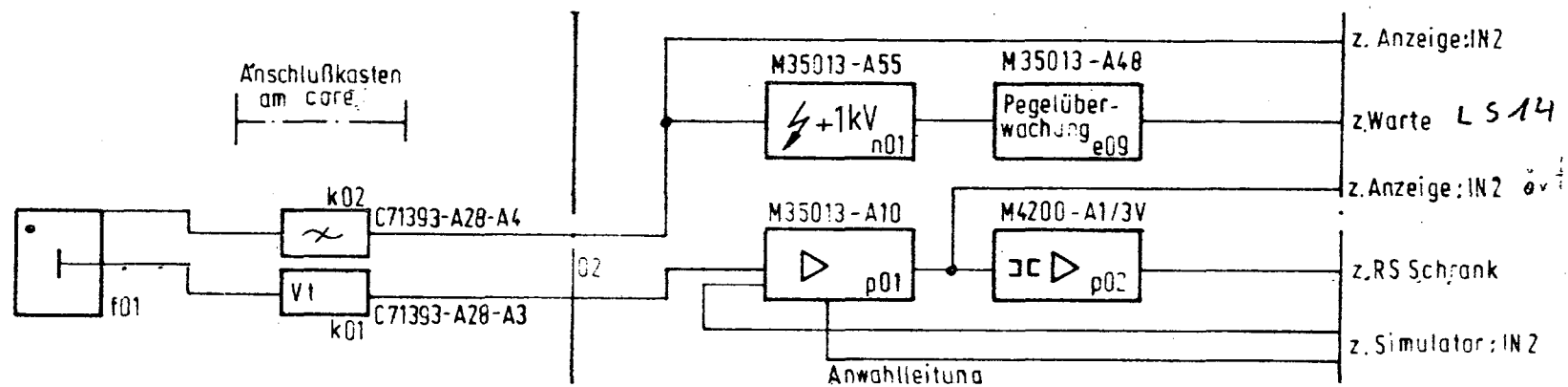


Figura 7

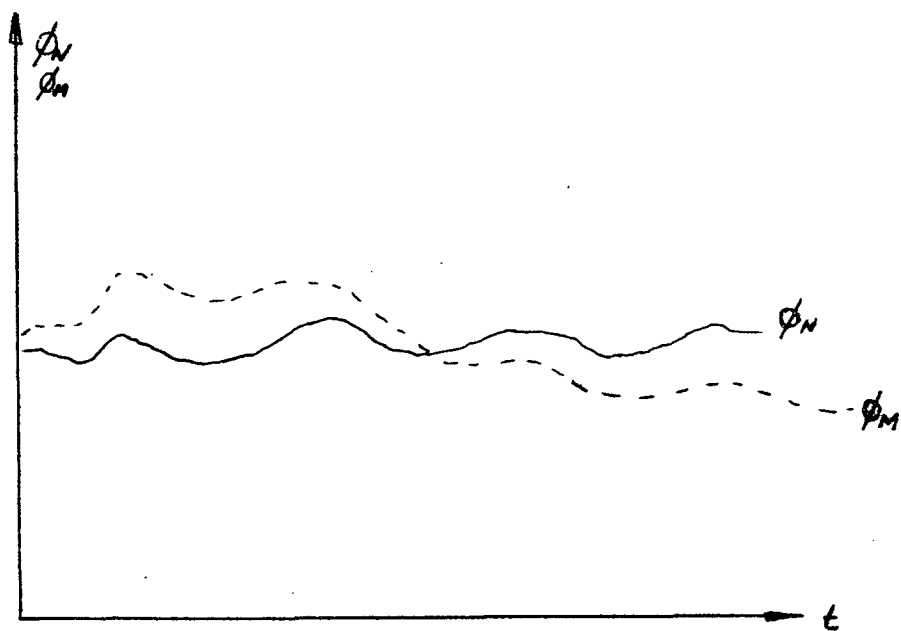


Figura 8

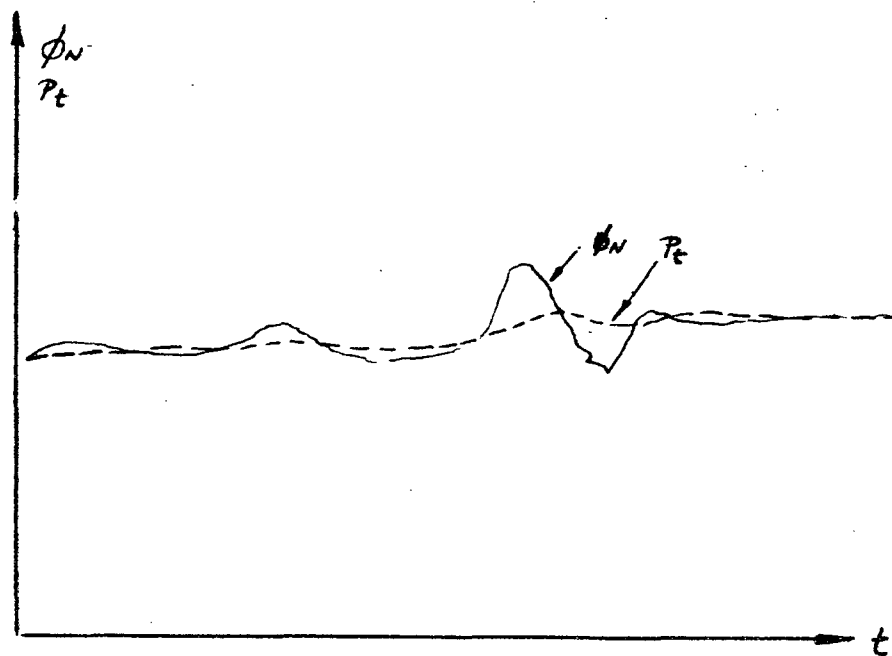
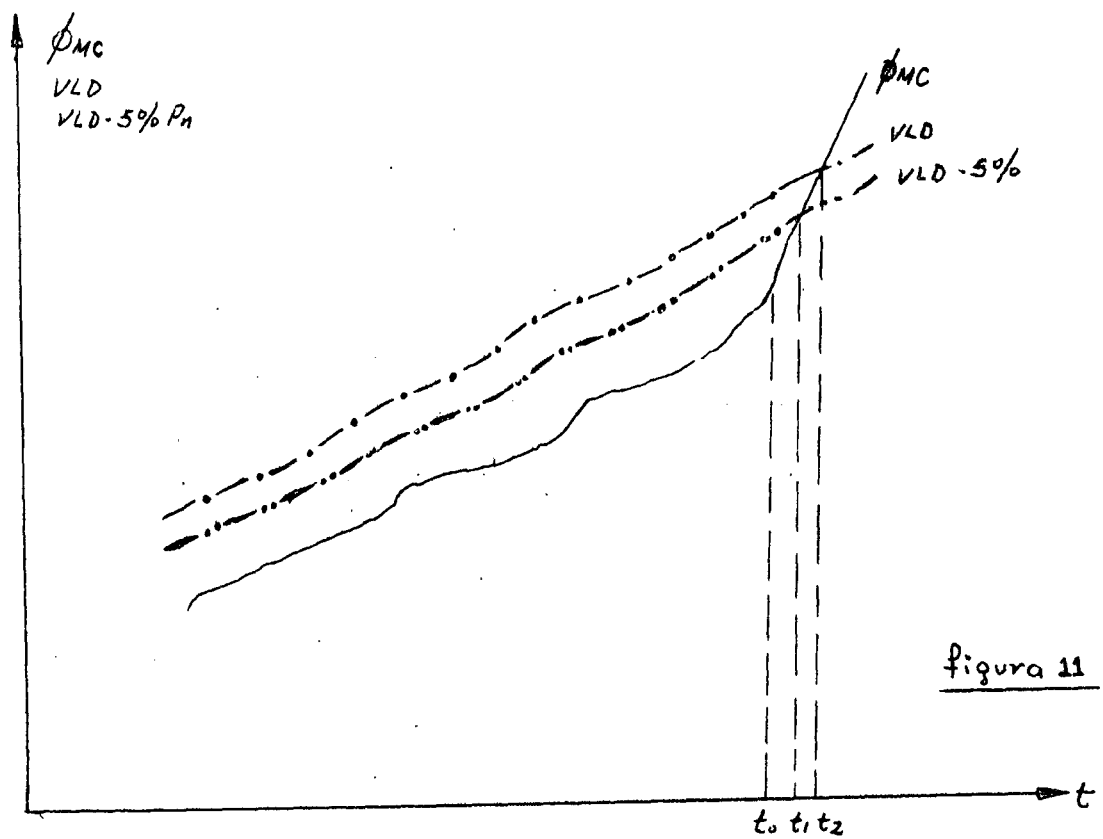
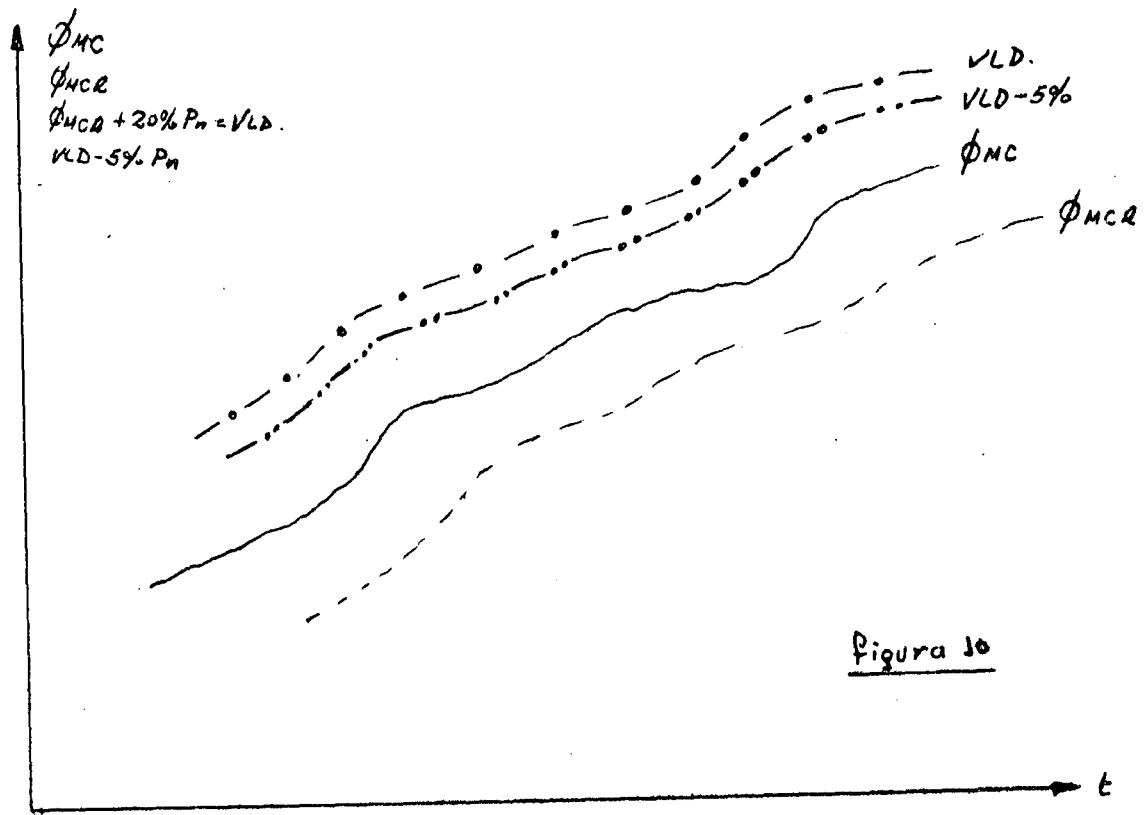


Figura 9



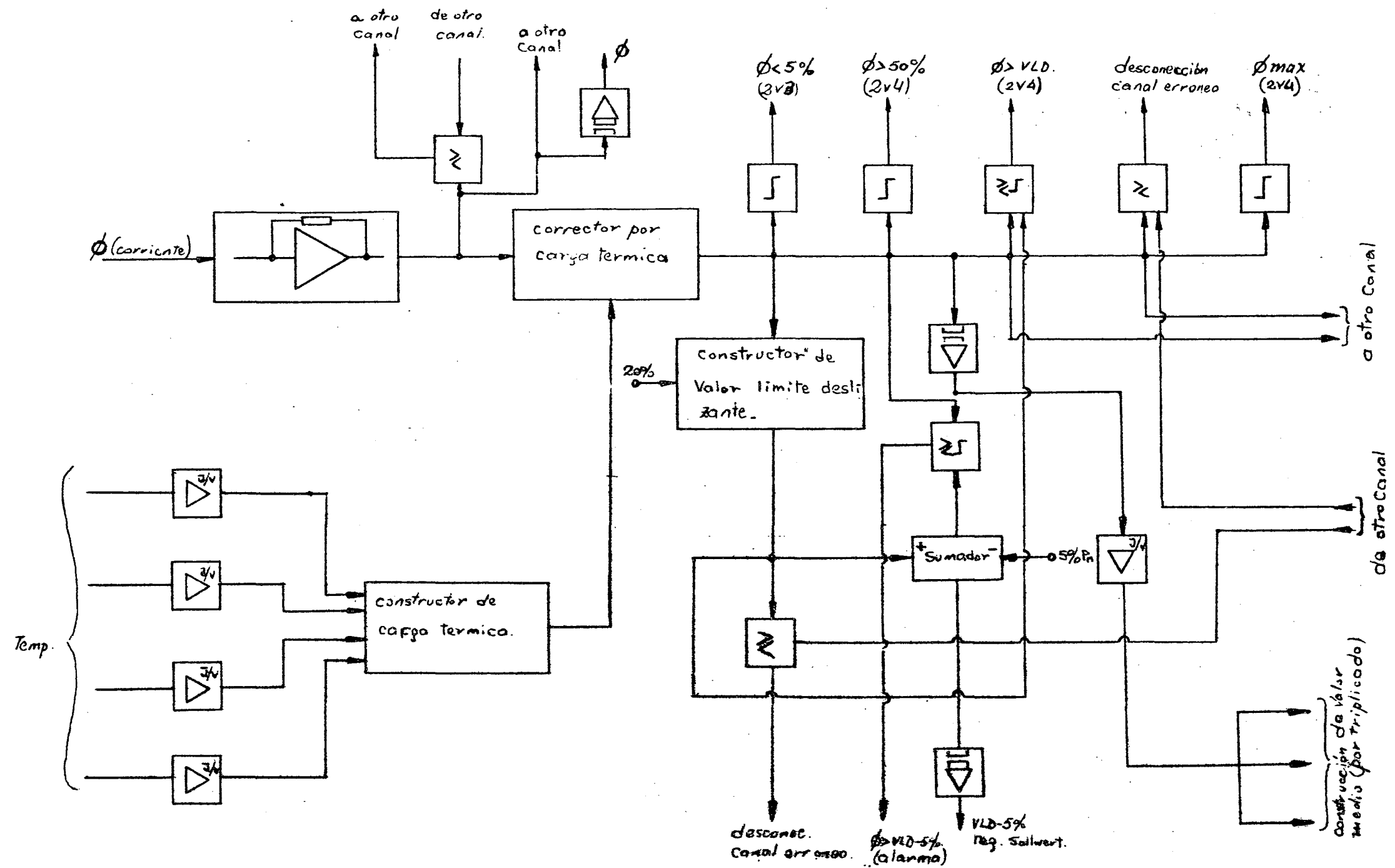
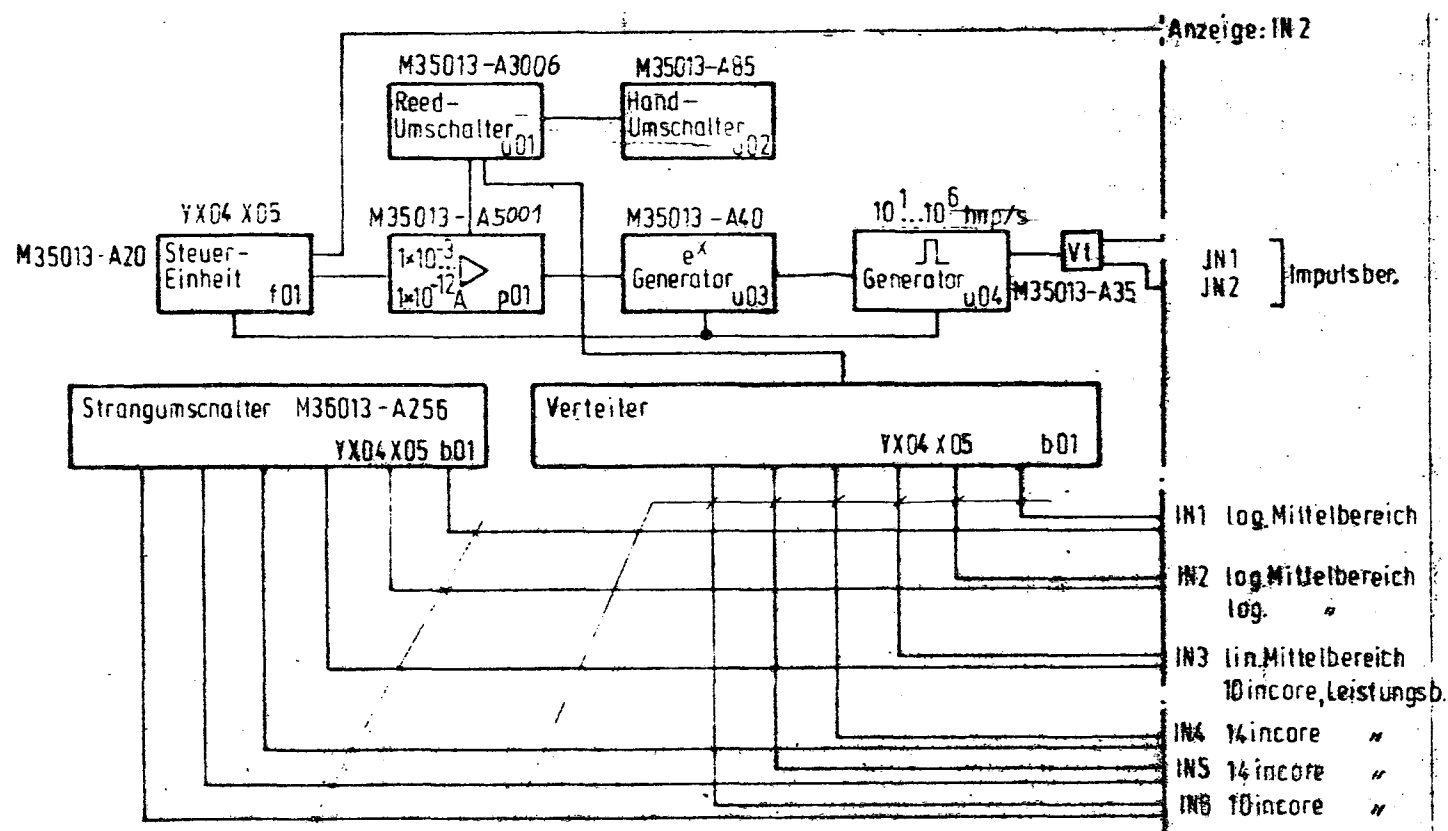
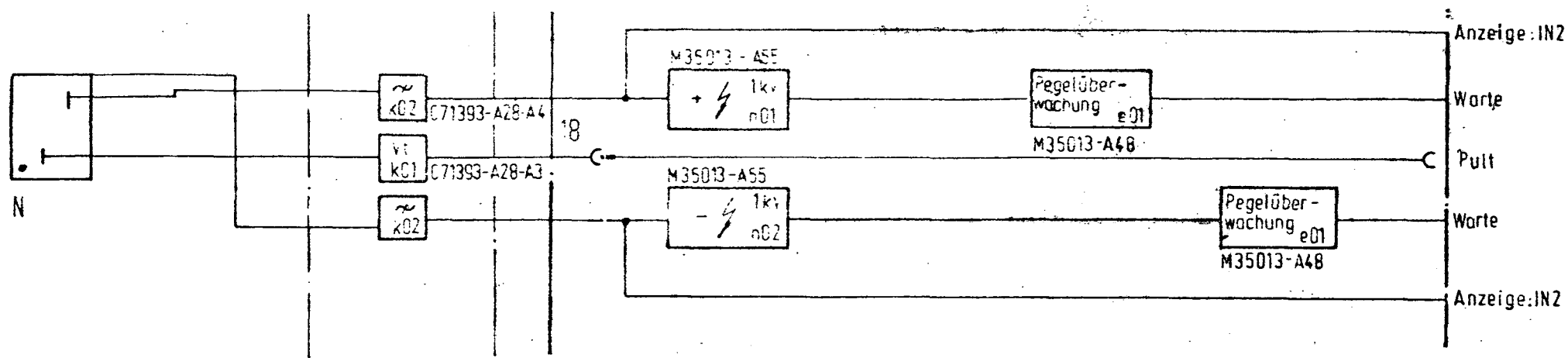


Figura 12



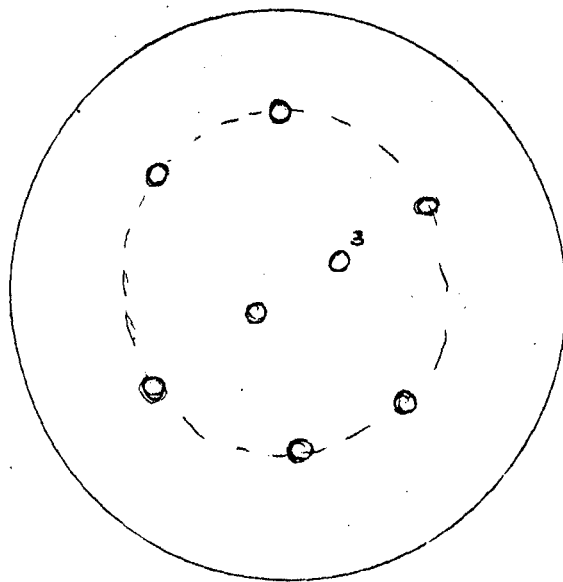


Fig 15

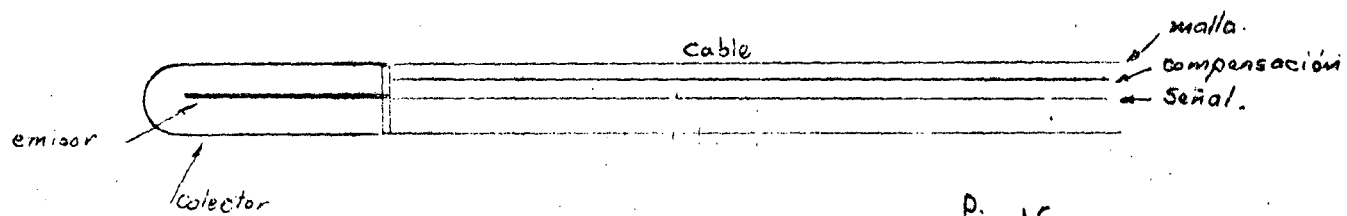


Fig 16

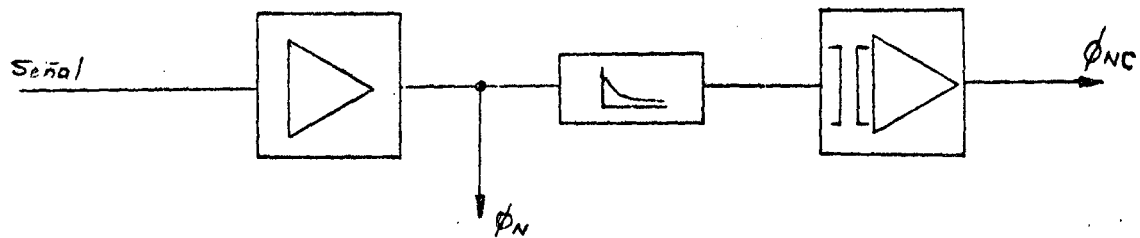


Fig 17