



El núcleo y sus radiaciones

clase 9

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas - UNLP
Instituto de Física La Plata - CONICET
Calle 49 y 115 La Plata





Sistemas detectores.

Dispositivos básicos y señales.

La mayoría de los detectores de radiación utilizados en Medicina Nuclear y otras ramas de la ciencia trabajan en un "modo de pulso"; se genera pulso de voltaje o corriente que se cuentan para determinar el número de eventos detectados

Adicionalmente mediante el análisis de alguna característica (como la amplitud) de los pulsos de salida del detector, es posible determinar la energía de cada radiación detectada, el momento de la detección, diferencia temporal entre eventos, discriminar eventos y seleccionar los deseados, etc.

Cuando se habla de un detector, en realidad se trata del detector propiamente dicho y una rama analizadora. Este dispositivo detector está compuesto por un cierto número de componentes electrónicos básicos.

Estos componentes están presentes en sistemas que van desde la mayoría de los contadores de más simples hasta los más complejos instrumentos de imágenes médicas.

En estas próximas clases describiremos los principios básicos de funcionamiento de estos componentes.

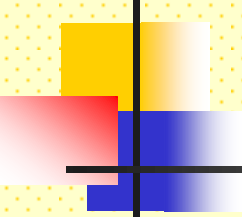


Sistemas detectores.

Dispositivos básicos y señales.

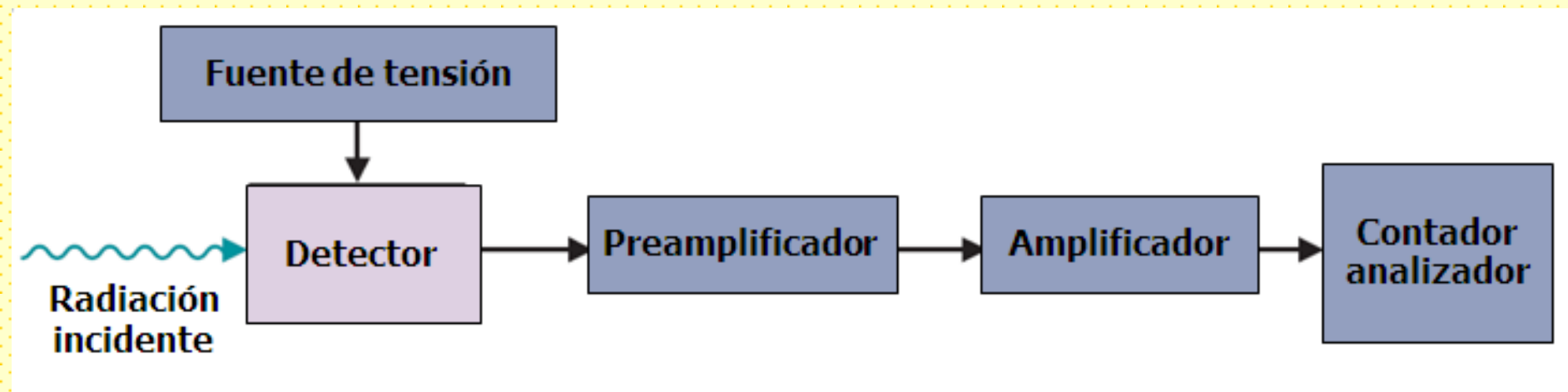
Características de los pulsos de salida de los detectores mas comúnmente empleados en medicina nuclear. Notar que la mayoría de ellos producen pulso de muy pequeña amplitud (salvo el Geiger Müller)

Detector	Signal (V)	Pulse Duration (µsec)
Sodium iodide scintillator with photomultiplier tube	10^{-1} -1	0.23*
Lutetium oxyorthosilicate scintillator with photomultiplier tube	10^{-1} -1	0.04*
Liquid scintillator with photomultiplier tube	10^{-2} - 10^{-1}	10^{-2} *
Lutetium oxyorthosilicate scintillator with avalanche photodiode	10^{-5} - 10^{-4}	0.04*
Direct semiconductor detector	10^{-4} - 10^{-3}	10^{-1} -1
Gas proportional counter	10^{-3} - 10^{-2}	10^{-1} -1
Geiger-Müller counter	1-10	50-300



Sistemas detectores. Dispositivos básicos y señales.

Sistema detector básico.

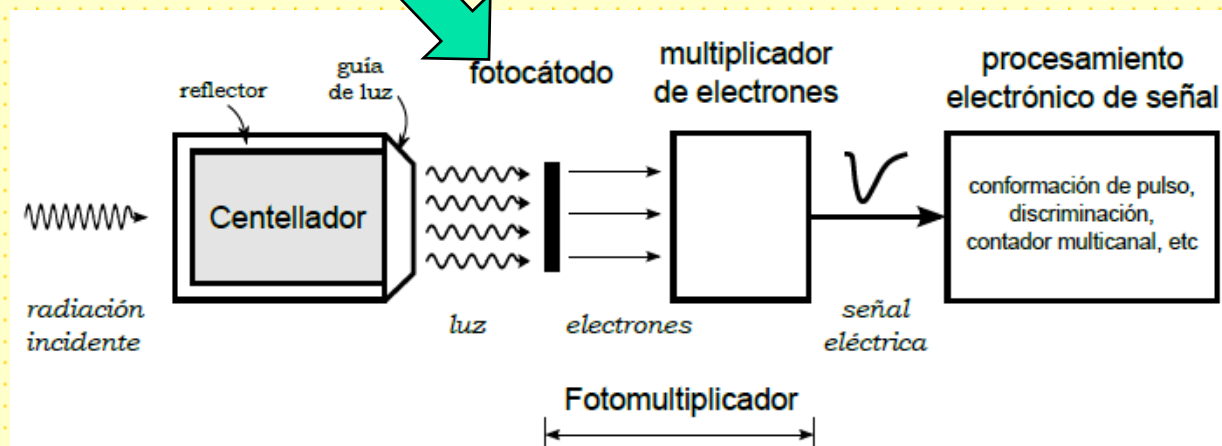
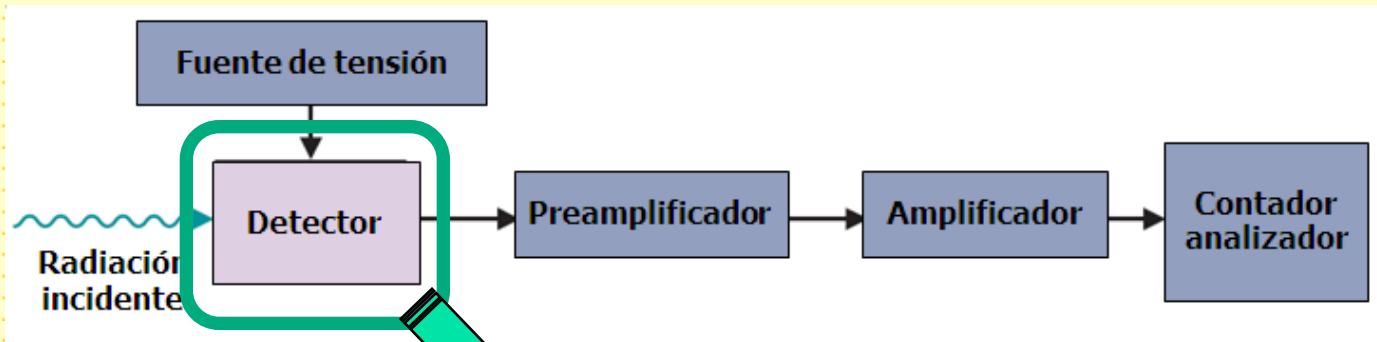


Describiremos a continuación cada elemento por separado.

Sistemas detectores.

Dispositivos básicos y señales.

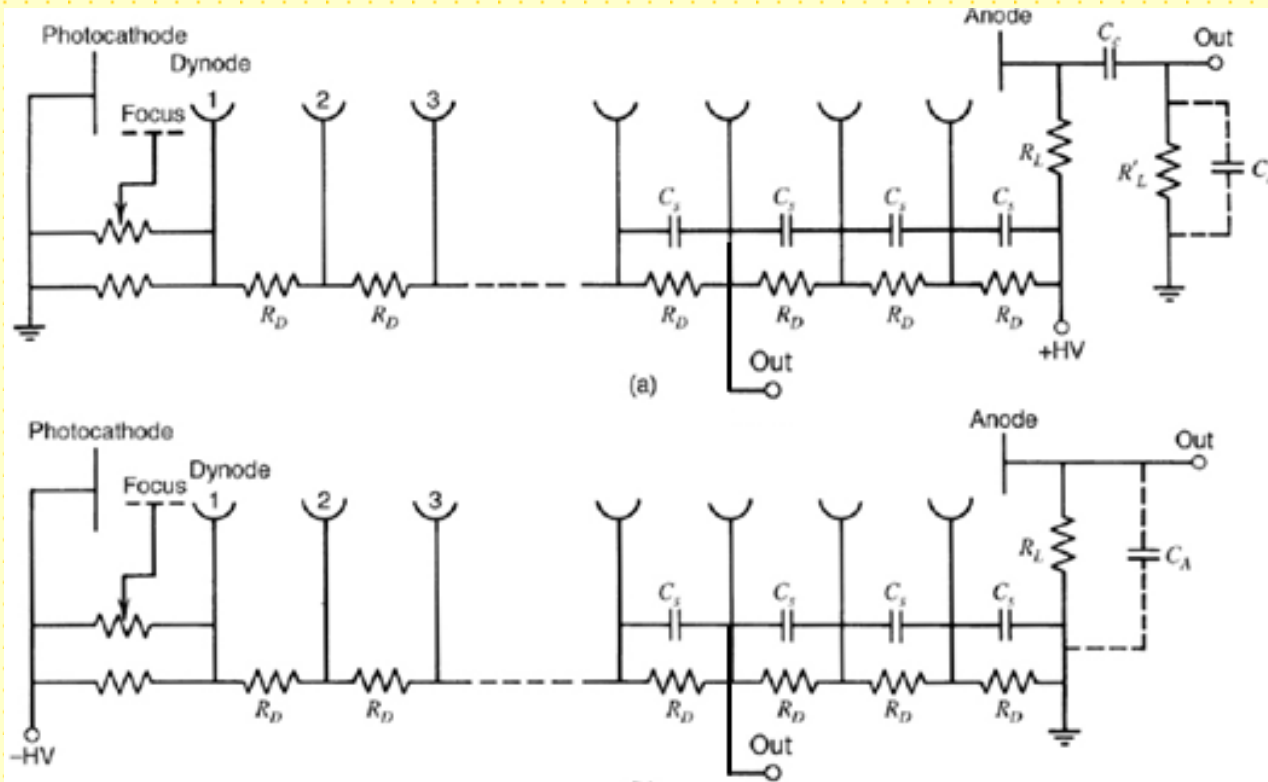
Si consideramos un detector centellador, tendremos en realidad:



Sistemas detectores.

Dispositivos básicos y señales.

El fotomultiplicador tiene dos salidas: una de dinodo y otra de ánodo.

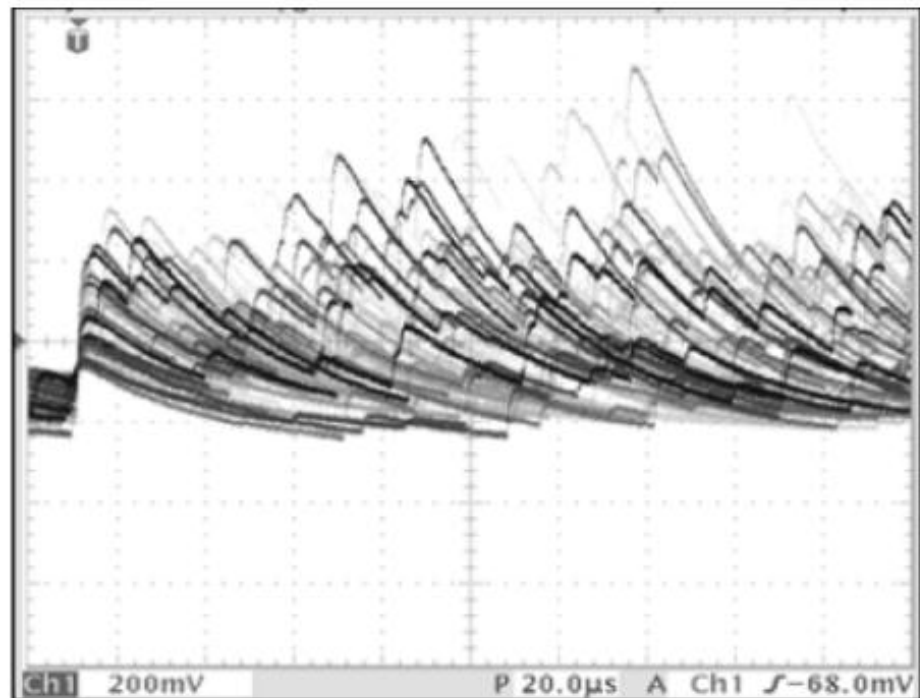
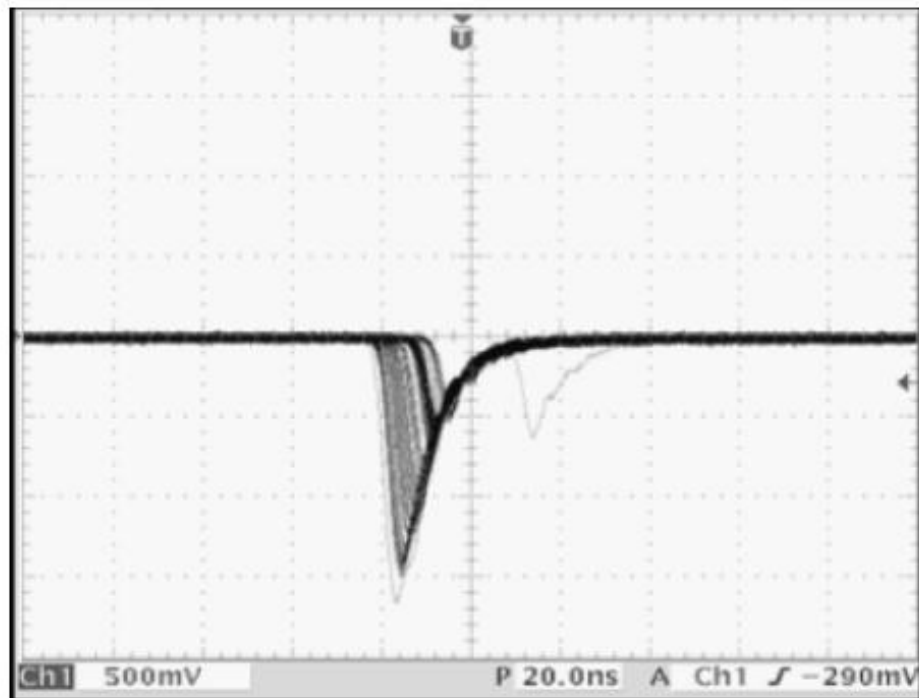


La salida de dinodo se toma en un punto de la cadena de multiplicación antes del ánodo.

Por lo tanto el pulso eléctrico de dinodo tiene una amplitud menor al de ánodo.

Sistemas detectores. Dispositivos básicos y señales.

Salidas de ánodo y dinodo. Notar la diferencia de altura





Señales en Física Nuclear. Terminología.

Los detectores modernos proveen una amplia información de la radiación detectada en la forma de un pulso eléctrico.

Para extraer esta información, la señal debe ser procesada por un sistema electrónico.

Este sistema debe estar diseñado para realizar una enorme variedad de tareas:

- Distinguir entre diferentes señales,
- Extraer información de la energía de la radiación incidente
- Determinar la diferencia temporal relativa entre dos eventos.

Entre otras.

Además, a partir de estos datos, debe "tomar decisiones", como ser aceptar o no un dado evento.

Como mencionamos, todas estas tareas se realizan mediante un sistema electrónico modular.

Antes de describir este sistema, daremos algunas definiciones básicas en el campo de la electrónica nuclear.

Describiremos un pulso ideal. En la práctica, los pulsos se distorsionan por diversos factores. Todas las definiciones aquí dadas siguen siendo válidas para el caso real.

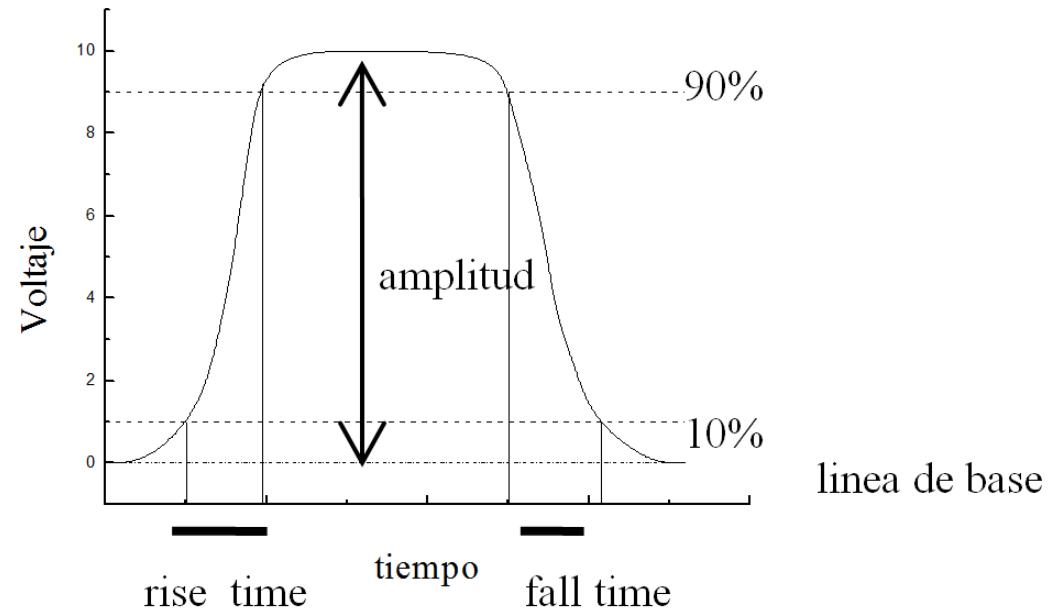
Señales en Física Nuclear. Terminología.

La codificación de la información se realiza en la forma de un pulso eléctrico. La información puede estar contenida en una o más características del pulso:

- Amplitud
- Polaridad
- Forma
- Simplemente en su mera presencia.

En la electrónica nuclear el ancho del pulso puede variar desde los microsegundos hasta fracciones de nanosegundos.

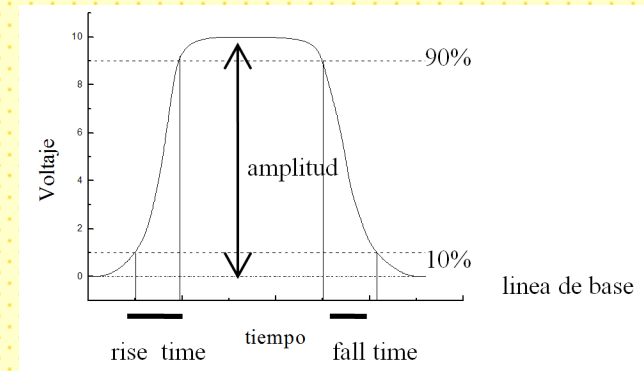
Pulso rectangular ideal de voltaje (o corriente) en función del tiempo



Señales en Física Nuclear. Terminología.

Línea de base: nivel de voltaje (o corriente) al cual el pulso decae. Si bien el valor de la línea de base es generalmente cero, es posible que tome otro valor por fluctuaciones en la forma del pulso, contaje, etc.

Altura del pulso (o amplitud): altura del pulso desde su máximo hasta la línea de base.



Ancho de la señal: duración de la señal, usualmente tomado a la mitad de la altura.

Borde frontal: flanco de la señal que arriba primero en tiempo

Borde trasero: el retrasado en tiempo.

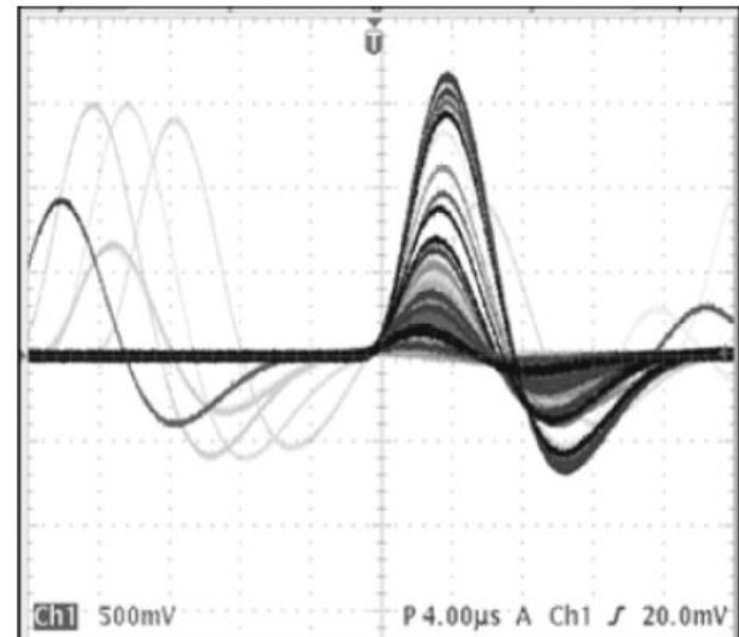
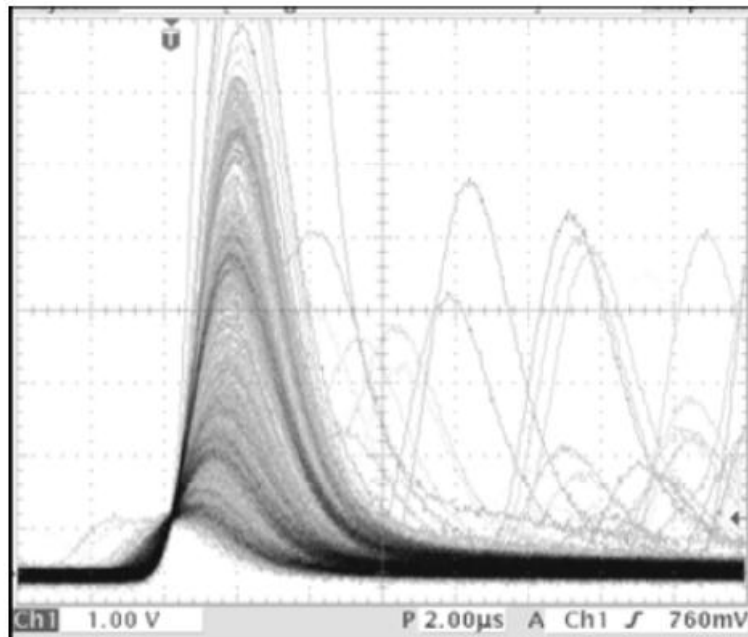
Rise time (tiempo de crecimiento): tiempo que le toma al pulso crecer desde el 10% al 90% de su amplitud. Determina la rapidez del sistema y es esencial en aplicaciones temporales.

Fall time (tiempo de caída): tiempo que le toma a la señal caer desde el 90% al 10% de su amplitud. Para un dado pulso, el rise time y el fall time no son necesariamente iguales.

Señales en Física Nuclear. Terminología.

Señales unipolares y bipolares: El pulso unipolar es aquel que tiene un único lóbulo enteramente por encima (o por debajo) la línea de base.

El pulso bipolar cruza la línea de base y forma un segundo lóbulo de polaridad opuesta al primero. El pulso bipolar es la derivada del unipolar.





Señales en Física Nuclear. Terminología.

Señales lineales y lógicas.

En el procesamiento de señales, es importante distinguir entre dos tipos de pulsos:

Pulso lineal (o analógica): pulso que lleva información en alguna de sus características (por ejemplo la amplitud o la forma). Una secuencia de pulsos lineales puede diferir entonces ampliamente en su forma o amplitud.

Pulso lógico (o digital): señal de amplitud y forma constante, que lleva información sólo en su presencia (o ausencia), o en el preciso tiempo de aparición.

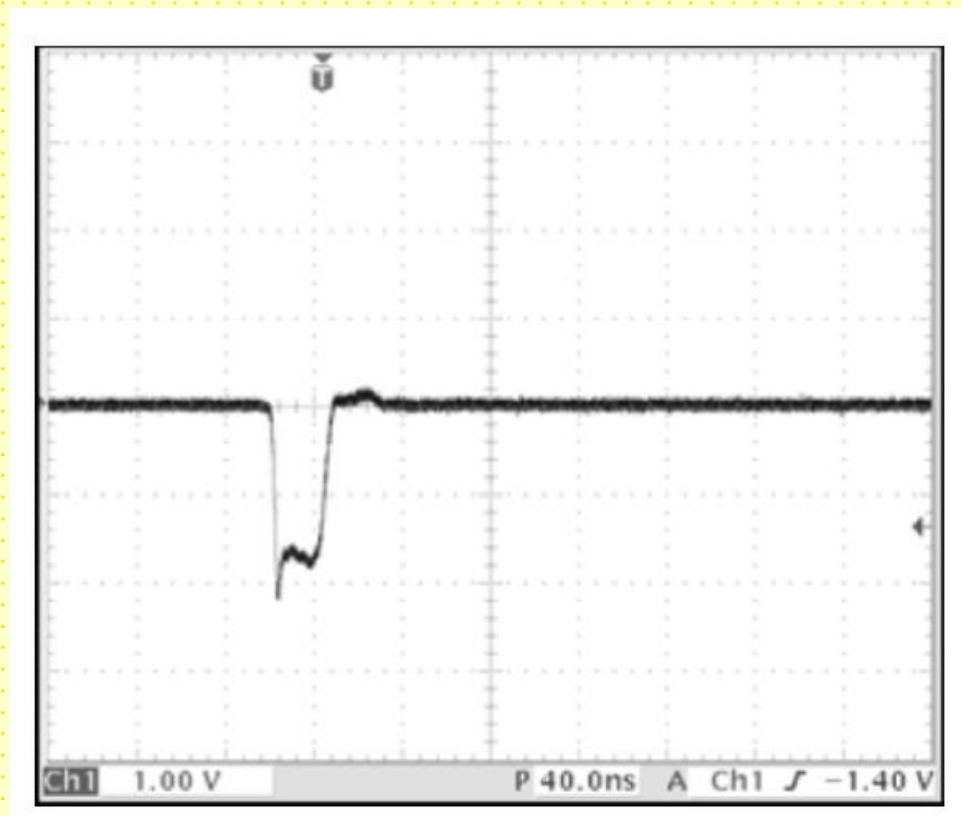
En cierto modo, las señales lógicas llevan menos información que las lineales. Sin embargo las señales lógicas son mucho menos afectadas por las distorsiones y el ruido introducido por el sistema analizador.

En general, todas las cadenas de detección y análisis comienzan a partir de un pulso lineal y en algún punto es convertido (de acuerdo a algún criterio predeterminado) en uno lógico.



Señales en Física Nuclear. Terminología.

Pulso lógico. Forma y tamaño constante. Independiente del evento que dio origen a la señal.





Señales en Física Nuclear. Terminología.

Señales lentas y rápidas.

Señales rápidas: rise time de unos pocos nanosegundos o menos.

Señales lentas: rise time del orden de los cientos de nanosegundos o más.

Los pulsos rápidos son muy importantes para aplicaciones temporales y altos contajes. Es fundamental preservar el corto rise time a lo largo del sistema analizador

Los pulsos lentos son generalmente menos susceptibles al ruido y ofrecen mejor información sobre altura de pulsos para estudios espectroscópicos.

En ciertas aplicaciones puede llegar a ser necesaria la utilización de ambos tipos de señales. Los pulsos rápidos deben ser tratados en forma diferente que los lentos.

Los pulsos rápidos son fácilmente afectados por las inductancias, capacitancias y resistencias de los circuitos y los cables conectores.

Además se deben tener en cuenta las distorsiones debidas a las reflexiones en los interconectores de los cables. Aparecen por el corto tiempo de duración de los pulsos rápidos con respecto al tiempo de tránsito en los cables.



Señales en Física Nuclear. Terminología.

Estandarización de los sistemas electrónicos: el sistema NIM.

La primera y más simple estandarización establecida para sistemas electrónicos en Física Nuclear es el sistema modular denominado **NIM (nuclear instruments modules)**.

La primera y más simple estandarización establecida para sistemas electrónicos en Física Nuclear es el sistema modular denominado NIM (nuclear instruments modules).

Los componentes electrónicos básicos (amplificadores, discriminadores, contadores, etc.) son construidos en forma de módulos de acuerdo a especificaciones mecánicas y eléctricas estandarizadas.

Los módulos se conectan en bins (también estandarizados) que entregan el voltaje a los módulos.



Señales en Física Nuclear. Terminología.

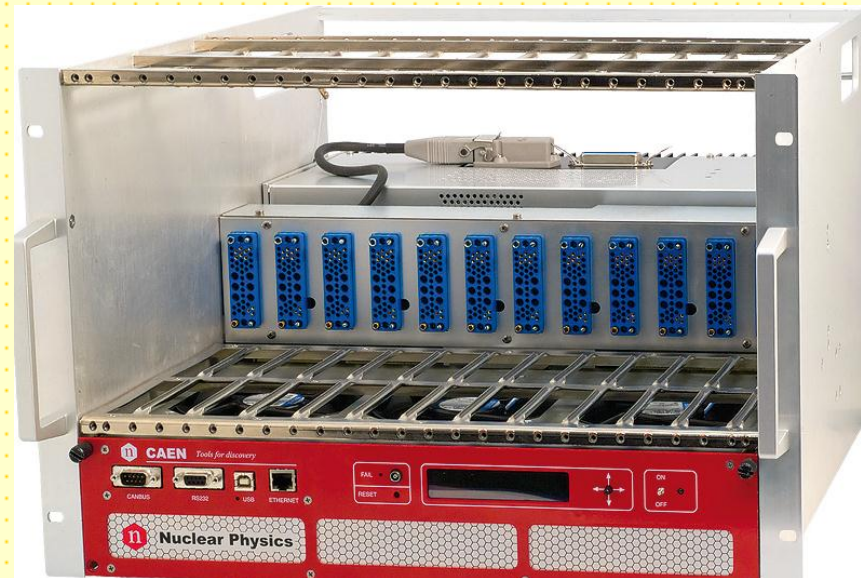
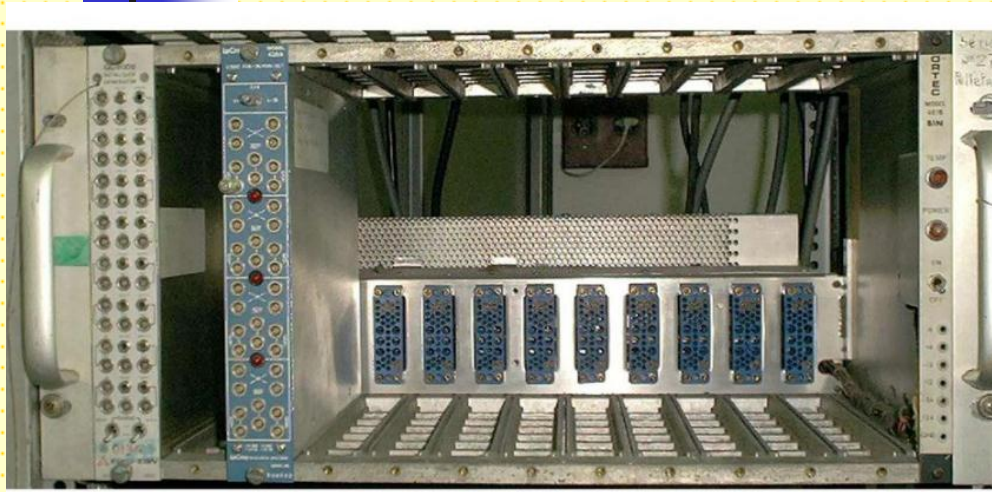
Cualquier módulo NIM puede ser conectado en cualquier bin NIM.

Cualquier sistema electrónico específico puede ser fácilmente creado coleccionando los módulos electrónicos necesarios, instalándolos en un bin NIM y realizando el cableado adecuado.

Después de realizado el experimento, los módulos pueden ser transferidos a otro NIM (incluso de otro laboratorio), ser combinados con otros módulos para otro uso o sencillamente ser almacenados para otro experimento.

Esto hace que el sistema NIM sea enormemente flexible, permitiendo un diseño sencillo, intercambio simple de módulos, fácil reemplazo de estos, etc, permitiendo una reducción de los costos y una utilización eficiente de los instrumentos.

Señales en Física Nuclear. Terminología.



Señales en Física Nuclear. Terminología.



Señales en Física Nuclear. Terminología.

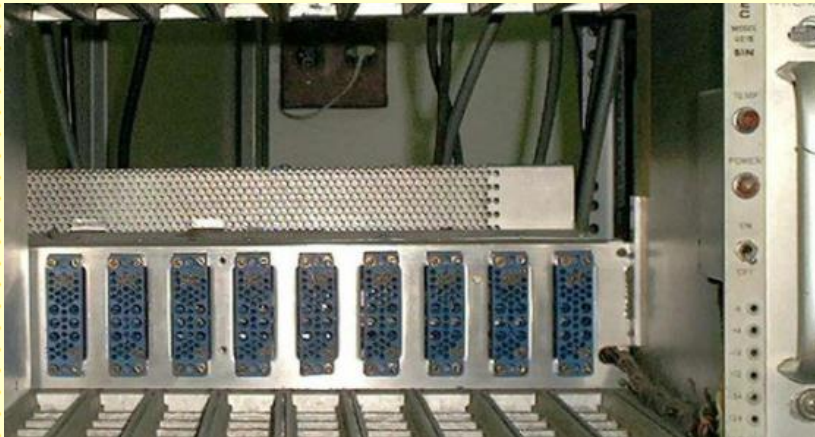


Señales en Física Nuclear. Terminología.

Módulos.

Los módulos NIM deben tener un ancho de 3,43 cm y una altura de 22,225 cm. Pueden ser construidos, sin embargo en múltiplos del ancho.

La alimentación se suministra a los módulos a través de conectores en la parte posterior del módulo, que encaja en el conector correspondiente del bin, el cual se conecta a la línea..

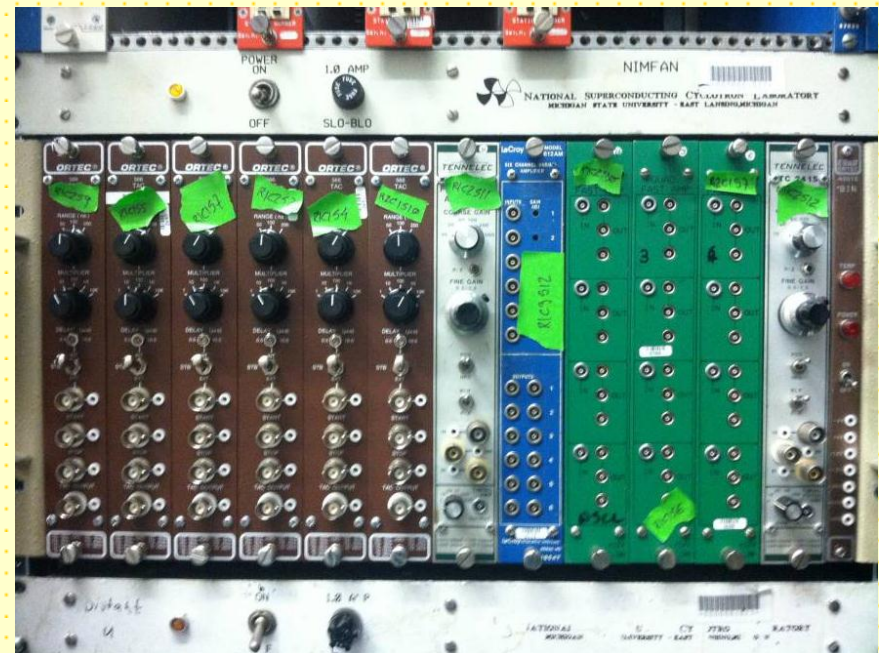


Más allá de las restricciones mecánicas y en el voltaje, el diseño individual de los módulos es libre.

Señales en Física Nuclear. Terminología.



El bin NIM estándar está diseñado para que quepan hasta 12 módulos de ancho simple. Los conectores de voltaje deben proveer cuatro voltajes estándar: ± 12 V y ± 24 V. Algunos bins proveen voltajes de ± 6 V, aunque estos voltajes no son parte del estándar NIM.





Señales en Física Nuclear. Terminología.

Señales lógicas.

Los módulos NIM incluyen instrumentos lineales o lógicos.

Señales lineales: información en la amplitud o forma de los pulsos.
Estas magnitudes varían entonces en forma continua.

Señales lógicas: tamaño y forma fija. Dos posibles estados, "si" y "no".
Es costumbre llamar a estos estados 0 y 1 (independientemente de cual es cual).

Aunque no es parte de la convención NIM, se ha establecido una estandarización para el rango de voltajes de las señales lógicas.

Lógica NIM positiva lenta
(impedancia de 1000Ω):

1 \rightarrow de +4 a +12 V

0 \rightarrow de +1 a -2 V

Lógica NIM negativa rápida
(con una impedancia de 50Ω):

1 \rightarrow de -14 a -18 mA

0 \rightarrow de -1 a +1 mA



El preamplificador.

La mayoría de los detectores producen pulsos de una amplitud relativamente pequeña.

Peor aún, la mayoría de los detectores tienen una impedancia de salida relativamente alta. (una alta resistencia interna al flujo de corriente eléctrica).

Por lo tanto, en el manejo de señales electrónicas es importante que las impedancias de los componentes sucesivos sean compatibles entre sí.

De lo contrario, interferencias electrónicas distorsionan el pulso (o incluso se pierde), degradando la eficiencia del sistema detector.



El preamplificador.

Las funciones de un preamplificador son:

- (1) Amplificar, si es necesario, las señales relativamente pequeñas producidas por el detector (fotomultiplicador en realidad).
- (2) Adaptar impedancias para que coincida con los niveles de impedancia con los componentes posteriores en el sistema.
- (3) Dar forma (conformar) al pulso para un procesamiento óptimo de la señal por Los componentes posteriores.

Al mismo tiempo, el preamplificador debe agregar la menor cantidad posible de ruido a la señal.

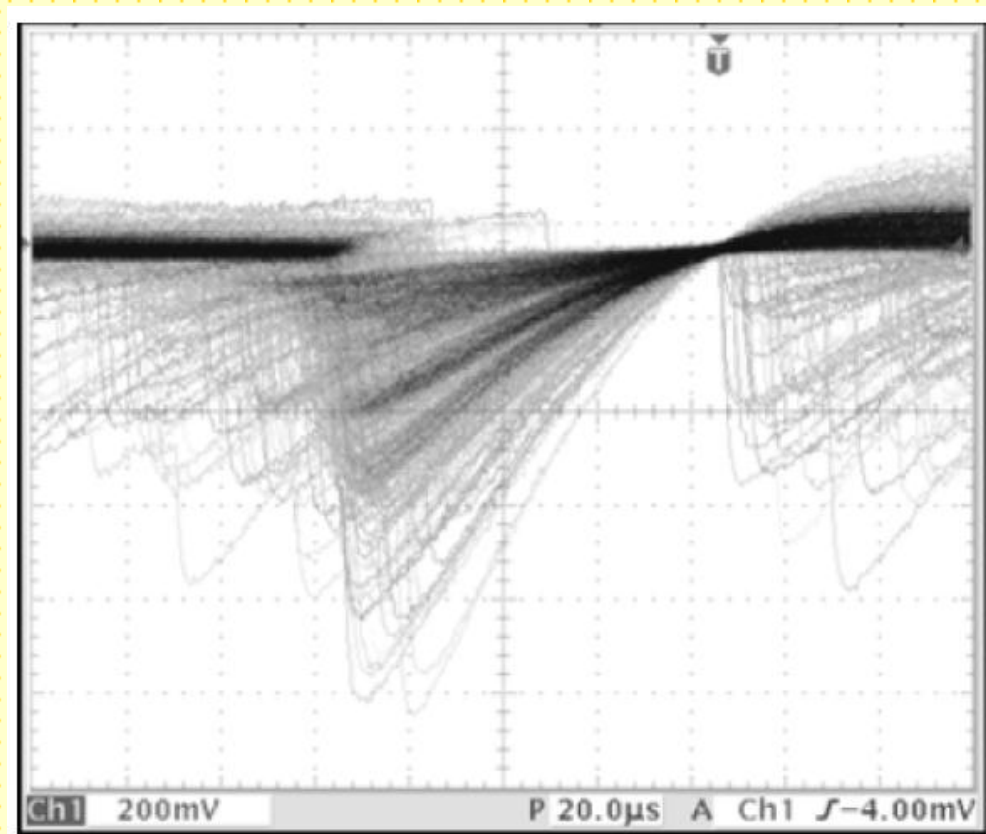
Debido a que la señal de entrada al preamplificador es muy débil, a fin de maximizar la relación señal-ruido, éste está montado lo más cerca posible del detector, de forma tal de minimizar lo más posible la longitud del cable conector.

De esta manera se reduce la influencia de los campos externos y la capacitancia del cable, la cual afecta negativamente la relación señal - ruido.



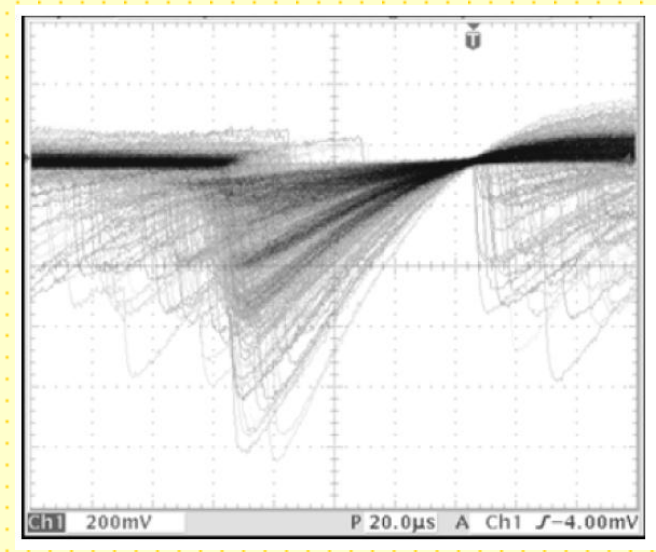
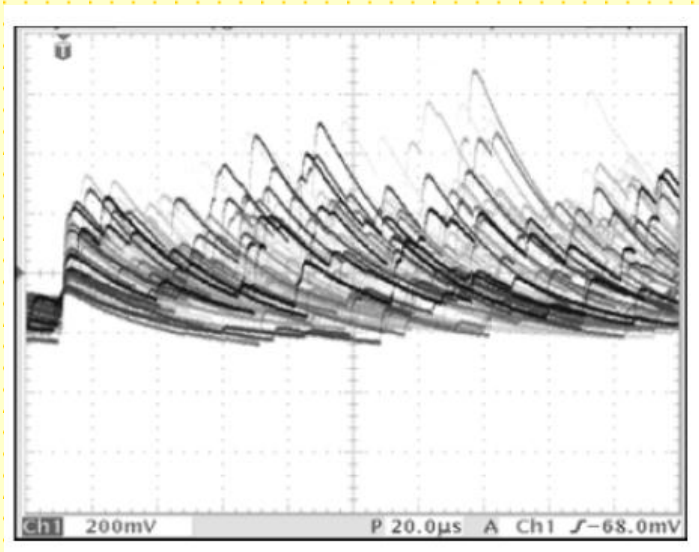
El preamplificador.

Los pulsos de salida se caracterizan por un rápido crecimiento seguido de una cola larga de forma exponencial. Duración menor al μs .



El preamplificador.

Salidas de ánodo del fotomultiplicador y salida del preamplificador.



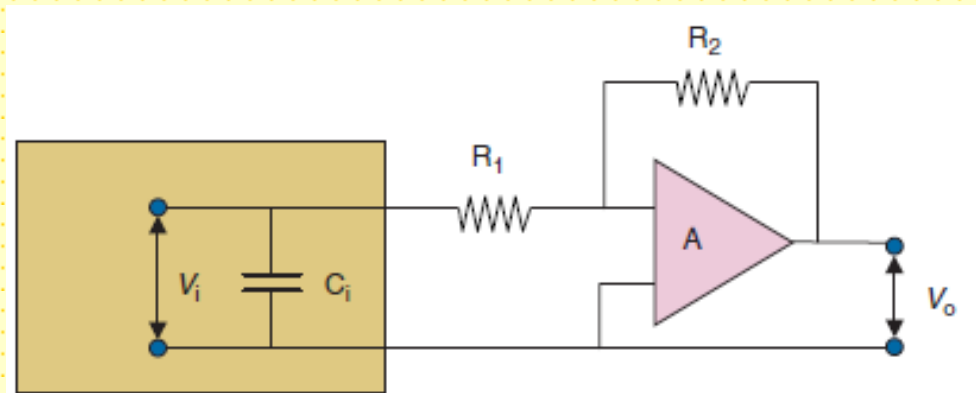
Ganancia poco mayor a 1. La amplificación es pequeña frente a la del fotomultiplicador y, como veremos, frente a la del amplificador.

Comentario: En el caso de los detectores centelleadores, una considerable amplificación se produce en la cadena de dinodos, por lo cual el pulso de salida de ánodo es manejable. En estos casos, la función del preamplificador es menos trascendente.

El preamplificador.

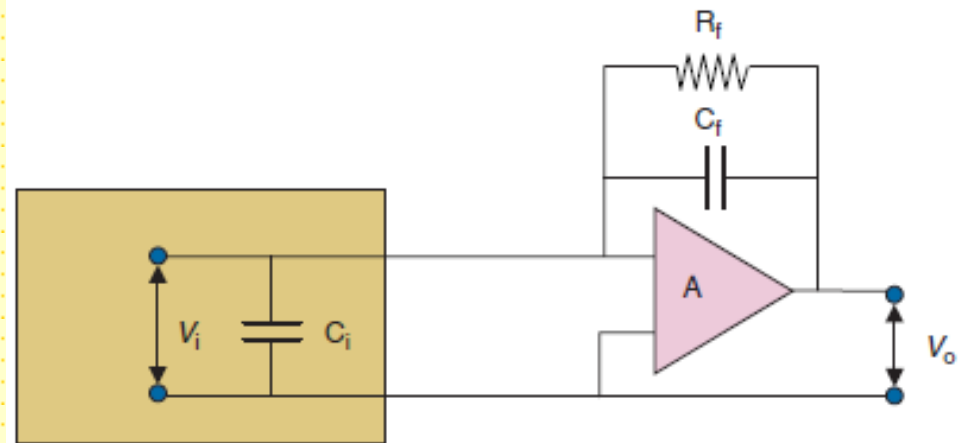
Hay dos configuraciones básicas de preamplificadores

Sensible al voltaje



Radiation detector

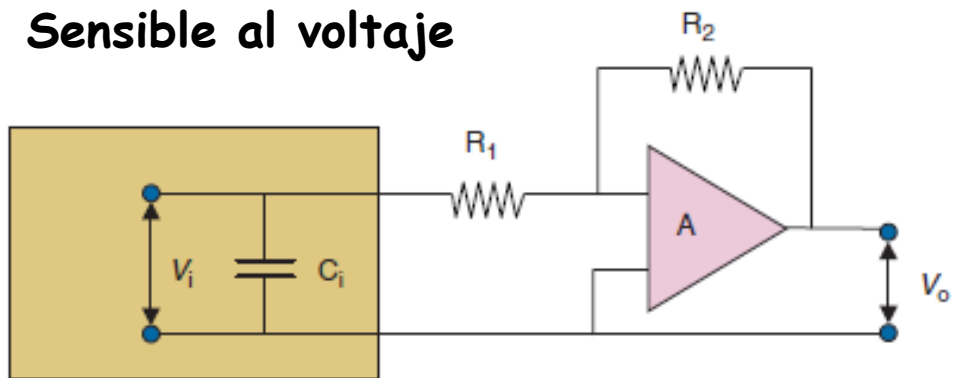
Sensible a la carga.



Radiation detector

El preamplificador.

Sensible al voltaje



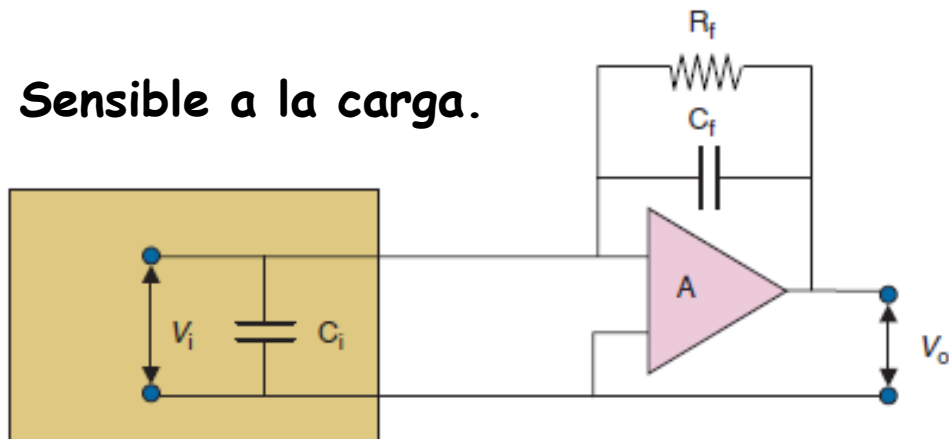
Radiation detector



Componente de amplificación.

Las resistencias y los capacitores conforman el pulso.

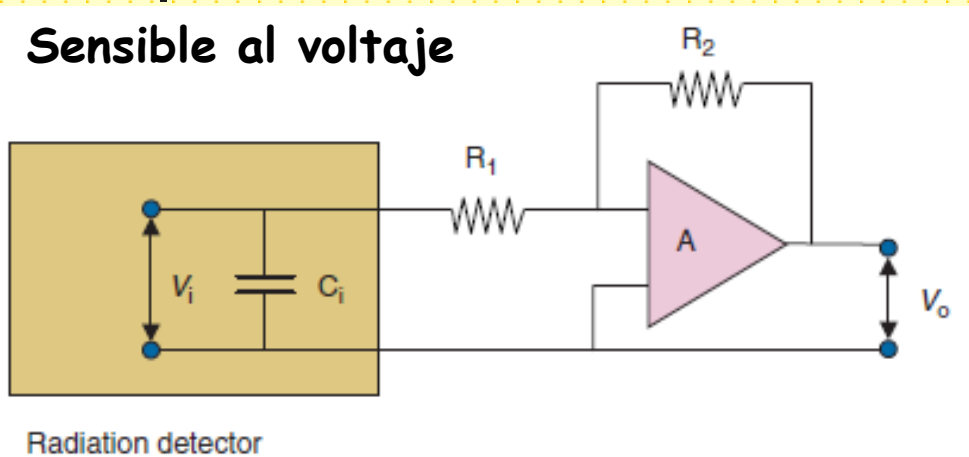
Sensible a la carga.



Radiation detector

El preamplificador.

Sensible al voltaje



Amplifica cualquier voltaje de entrada.

Dado que los detectores de radiación se basan en la colección de carga, la tensión de entrada, V_i , es:

$$V_i = \frac{Q}{C_i}$$

(recordar que Q es proporcional a la energía depositada por la radiación incidente).

El voltaje de salida del amplificador en esta configuración, V_o , es:

$$V_o \approx -\frac{R_2}{R_1} V_i$$

El «-» indica que cambio la polaridad del pulso.

V_o proporcional a Q y por ende a la energía depositada en el detector por la radiación incidente.

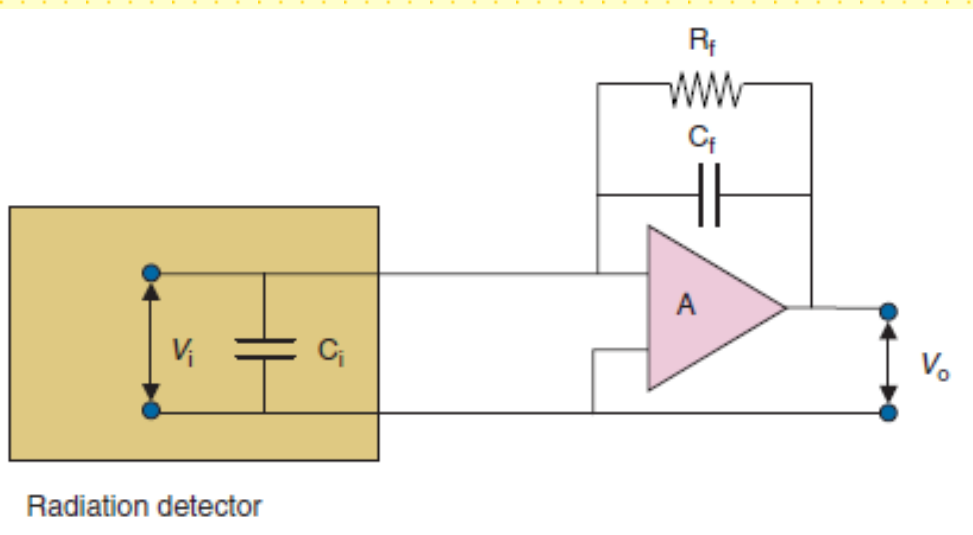
Linealidad del preamplificador.

El preamplificador.

En ciertos los detectores (ej., semiconductores), la capacitancia de entrada del detector es sensible a las condiciones de funcionamiento (en particular, temperatura).

La proporcionalidad entre carga y el voltaje a la entrada del preamplificador puede no ser estable. Se pierde la proporcionalidad.

Solución: preamplificador sensitivo a la carga.



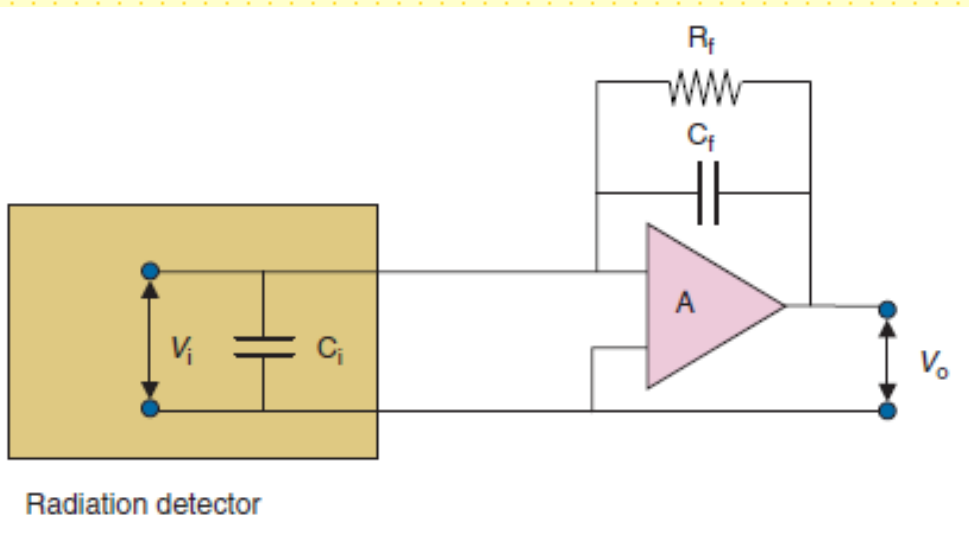
En este caso:

$$V_o \approx -\frac{Q}{C_f}$$

Independiente de C_i .

$$V = V_o e^{-t/R_f C_f}$$

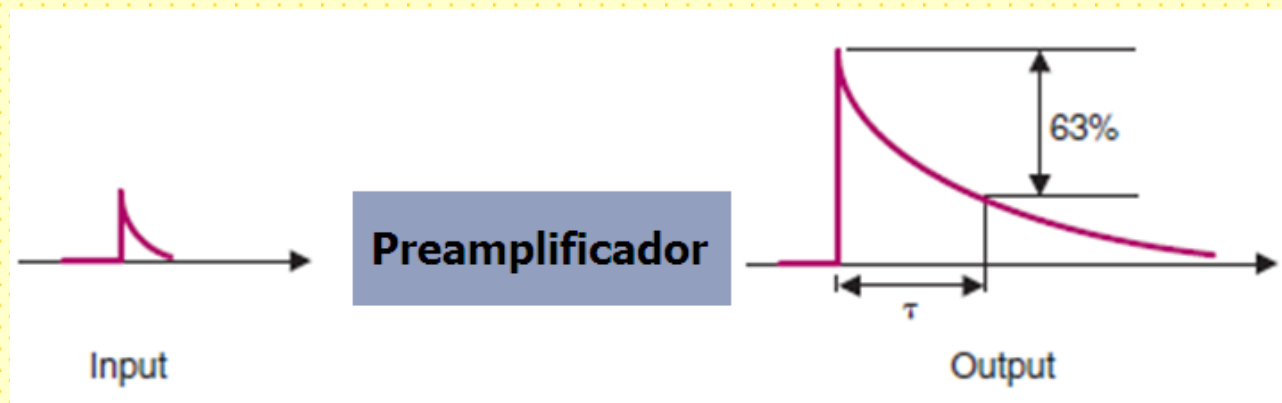
El preamplificador.



Constante temporal del circuito.

$$V = V_0 e^{-t/R_f C_f}$$

Valores típicos para detectores empleados en medicina nuclear: 20-200 μ seg.
(exceptuando aquellas aplicaciones que requieran señales rápidas).





El preamplificador.

El factor de amplificación proporcionada por el preamplificador varía con el tipo de detector.

Centelladores: el tubo PM ya proporciona un considerable grado de amplificación (10^6 - 10^7).
Relativamente poca amplificación adicional es necesaria.

Detectores semiconductores: señales eléctricas más débiles.
nivel relativamente alto de ganancia del preamplificador (en el rango 10^3 - 10^4).

Comentario: No es un Problema trivial diseñar un preamplificador que proporcione esta ganancia sin introducir ruido y que no tenga inestabilidades externas. La mayor parte de la oferta moderna de preamplificadores emplean transistores de efecto de campo, que proporcionan muy bajo nivel de ruido y estabilidad con la temperatura.



El amplificador.

El amplificador lineal provee dos funciones primarias:

- 1- Amplificar los pulsos del preamplificador.
- 2- Conformar el pulso.

En ambos casos, debe preservar la información de interés.

Si se requiere información temporal: respuesta rápida.

Si se desea información en energías: estricta proporcionalidad entre los pulsos de entrada y salida (amplificador lineal).

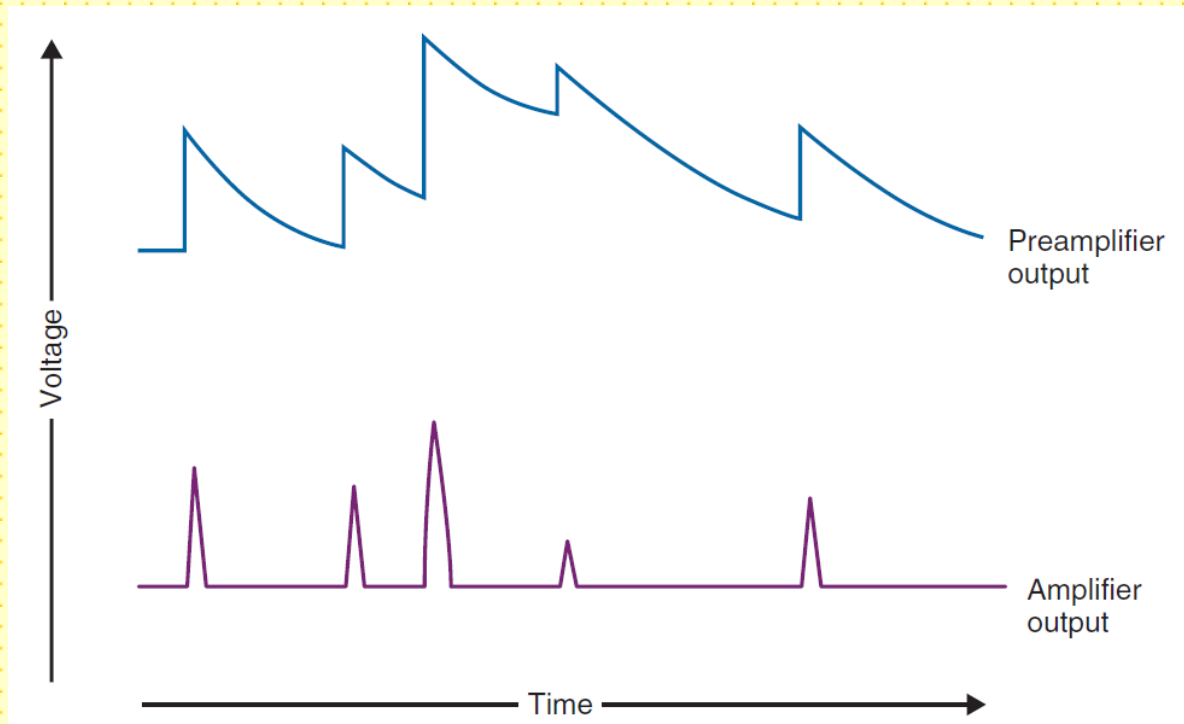
El **factor de amplificación (ganancia)** depende de la aplicación. Usualmente: de 1 a 100. Una relación conveniente es del orden de 10 V de amplitud del pulso por MeV depositado en el detector.

la ganancia se ajusta mediante una combinación de ajustes gruesos y finos.

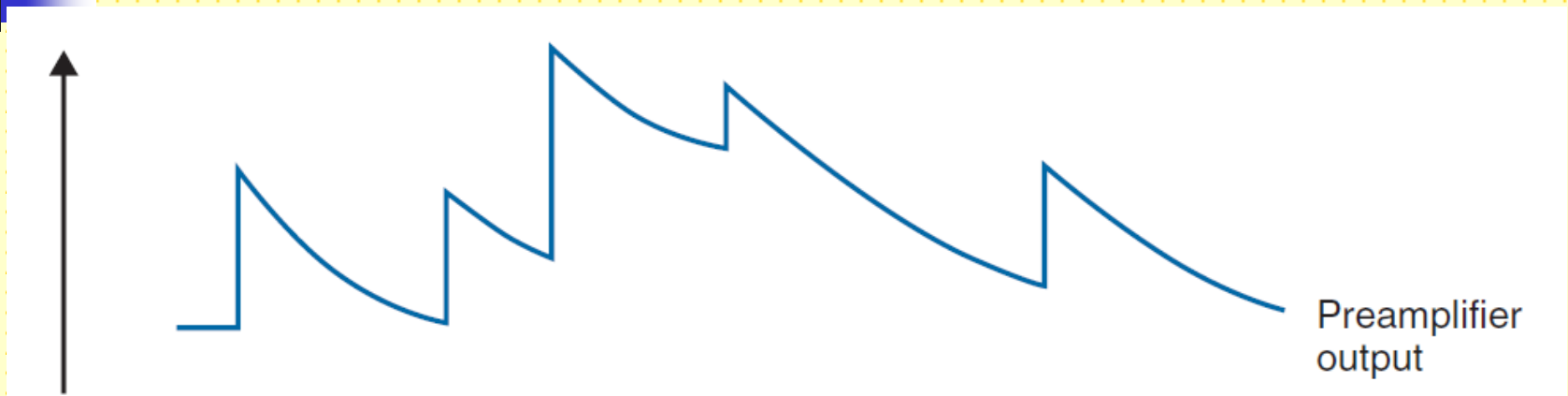


El amplificador.

La conformación del lento pulso de salida del preamplificador se realiza para dar un pulso de salida «estrecho» y evitar así el problema de apilamiento de pulsos a altas tasas de conteo y mejorar la relación señal-ruido.



El amplificador.

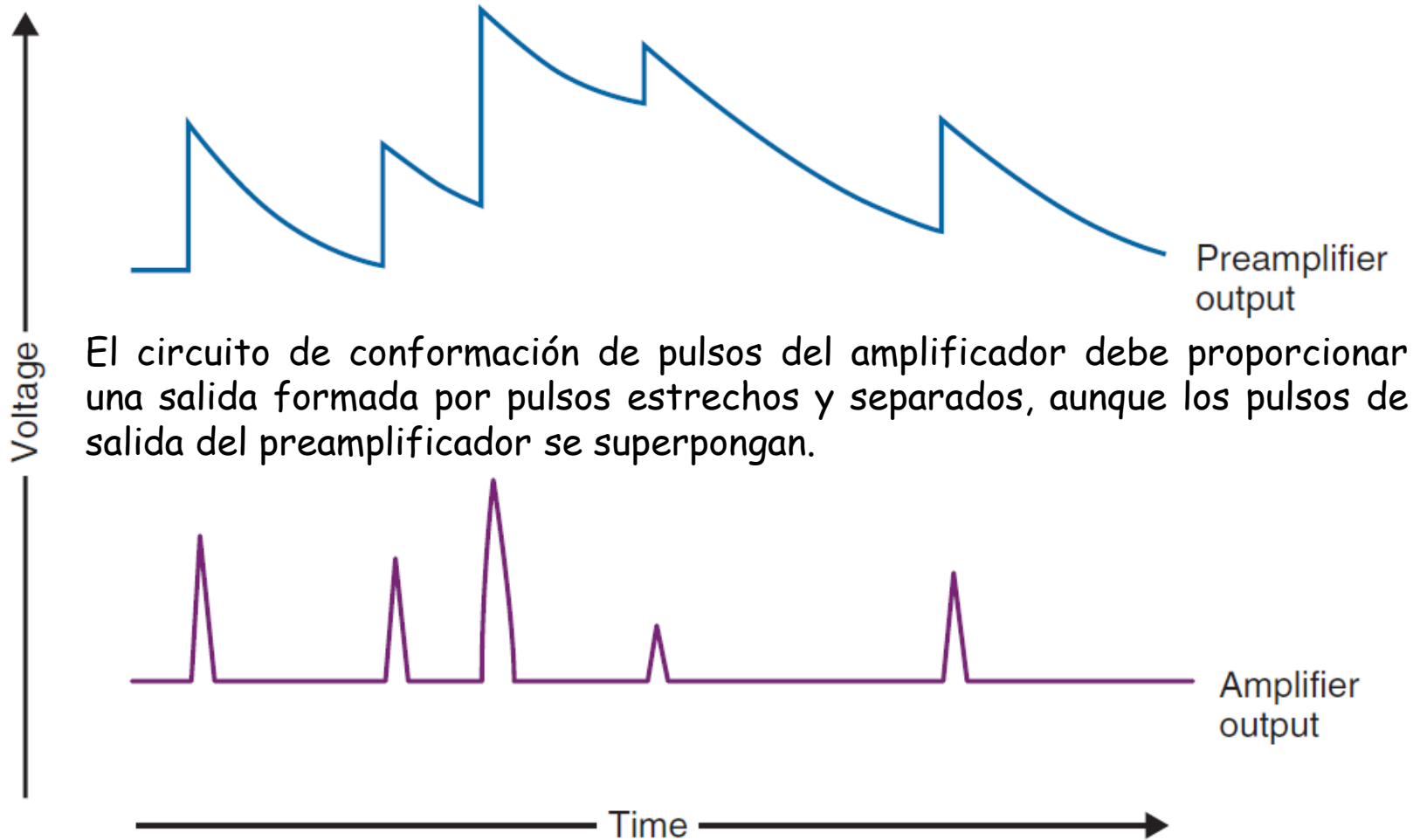


Constante de tiempo del orden de $500 \mu\text{sec}$,
Línea base: luego de aprox. $500 \mu\text{sec}$.

Si se produce un segundo pulso en una ventana de $500 \mu\text{sec}$, se monta en la cola del pulso previo. Amplitud incorrecta.

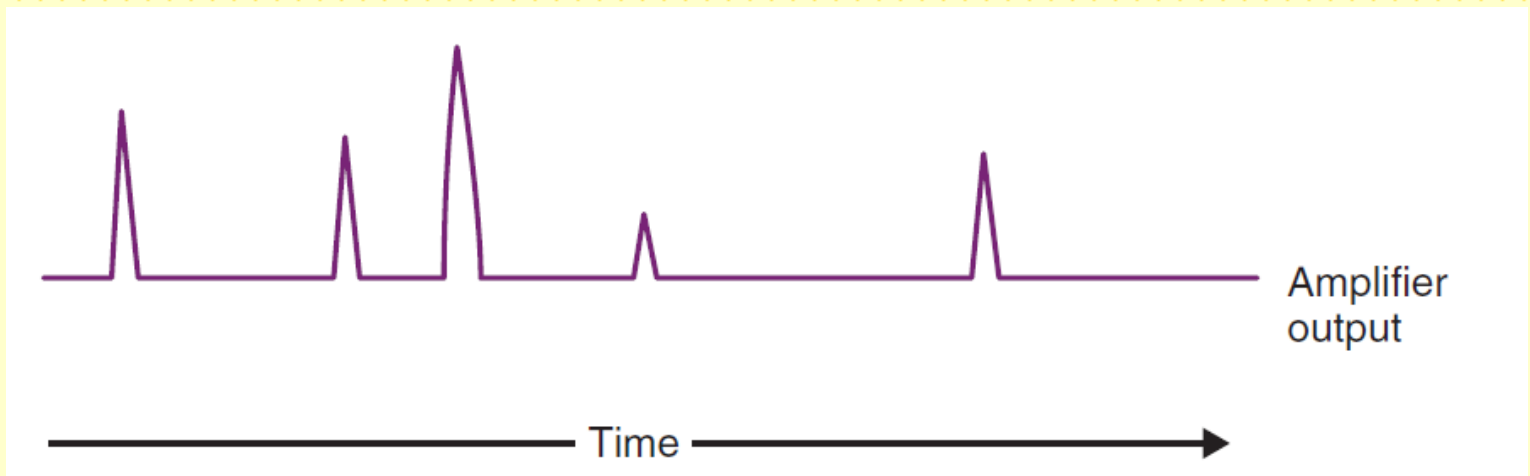
El sistema no puede operar a tasas de conteo superiores a unos pocos cientos de eventos por segundo sin introducir este tipo de distorsión de amplitud.

El amplificador.





El amplificador.



Debe hacer la conformación del pulso sin distorsionar la información del preamplificador:

- (1) Respetar la amplitud de pulso (proporcional a la energía depositada).
- (2) Respetar el rise time (tiempo en el cual el evento fue detectado).



El amplificador.

Si el producto de la amplitud de entrada y la ganancia supera la máxima amplitud de salida del amplificador, este **satura**.

Resultado: pulso de salida distorsionado, aplanado a la amplitud a la cual se produce la saturación.

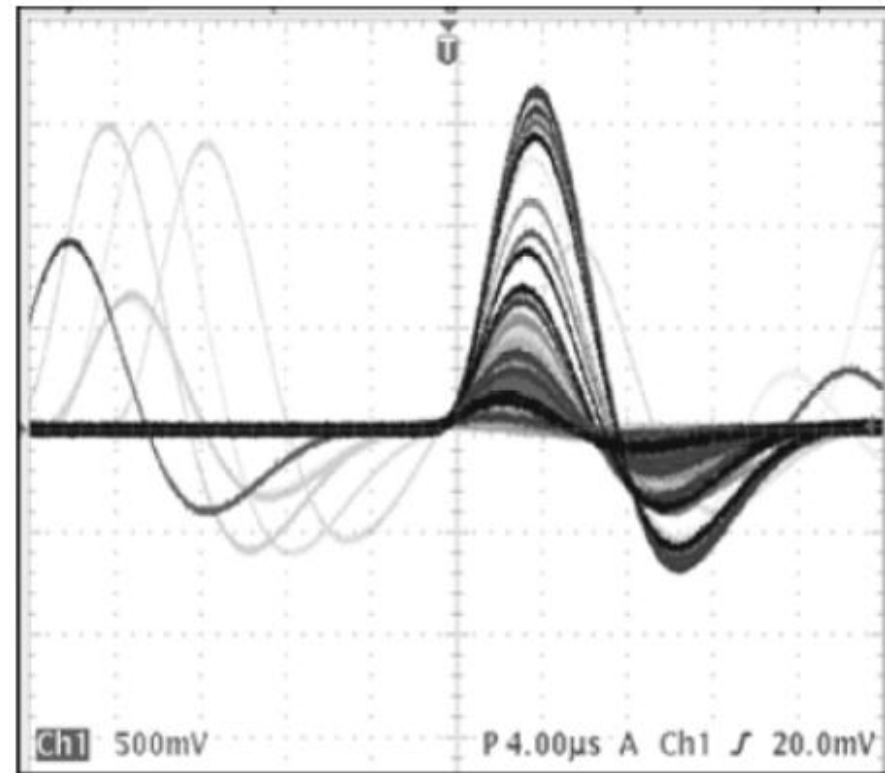
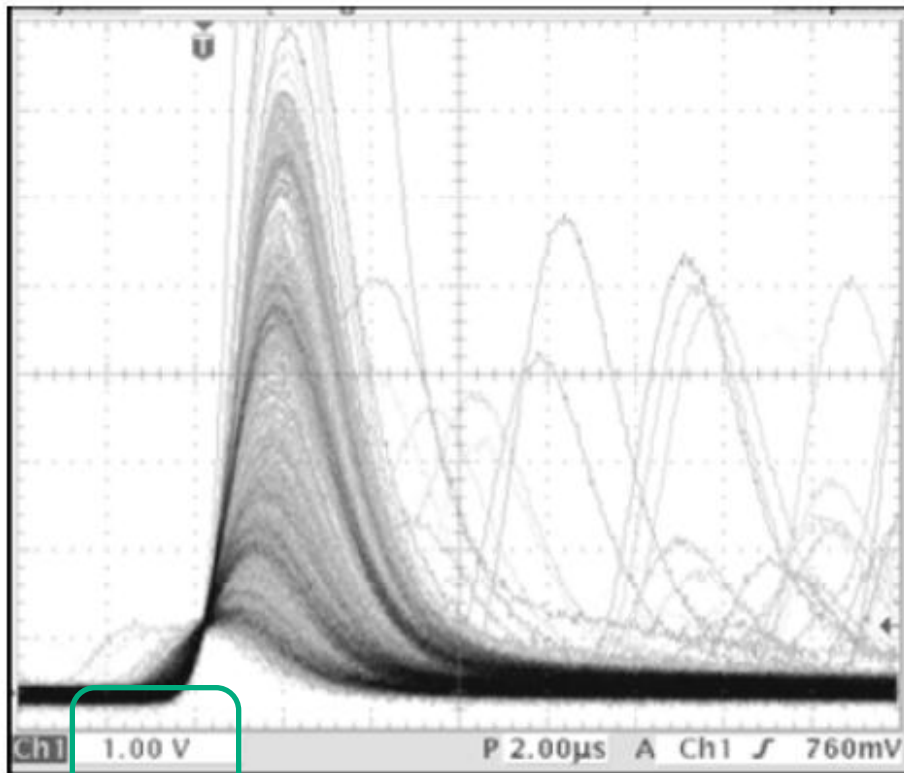
Esto se evita bajando la ganancia. Se debe evitar amplificar aquellos pulsos cercanos al nivel de saturación.

El amplificador lineal presenta dos tipos de salida:

- bipolar
- unipolar

La salida unipolar se encuentra retrasada unos 100 ms con respecto a la bipolar. Además, presenta un ajuste (*shaping time*) que permite variar el ancho del pulso.

El amplificador.



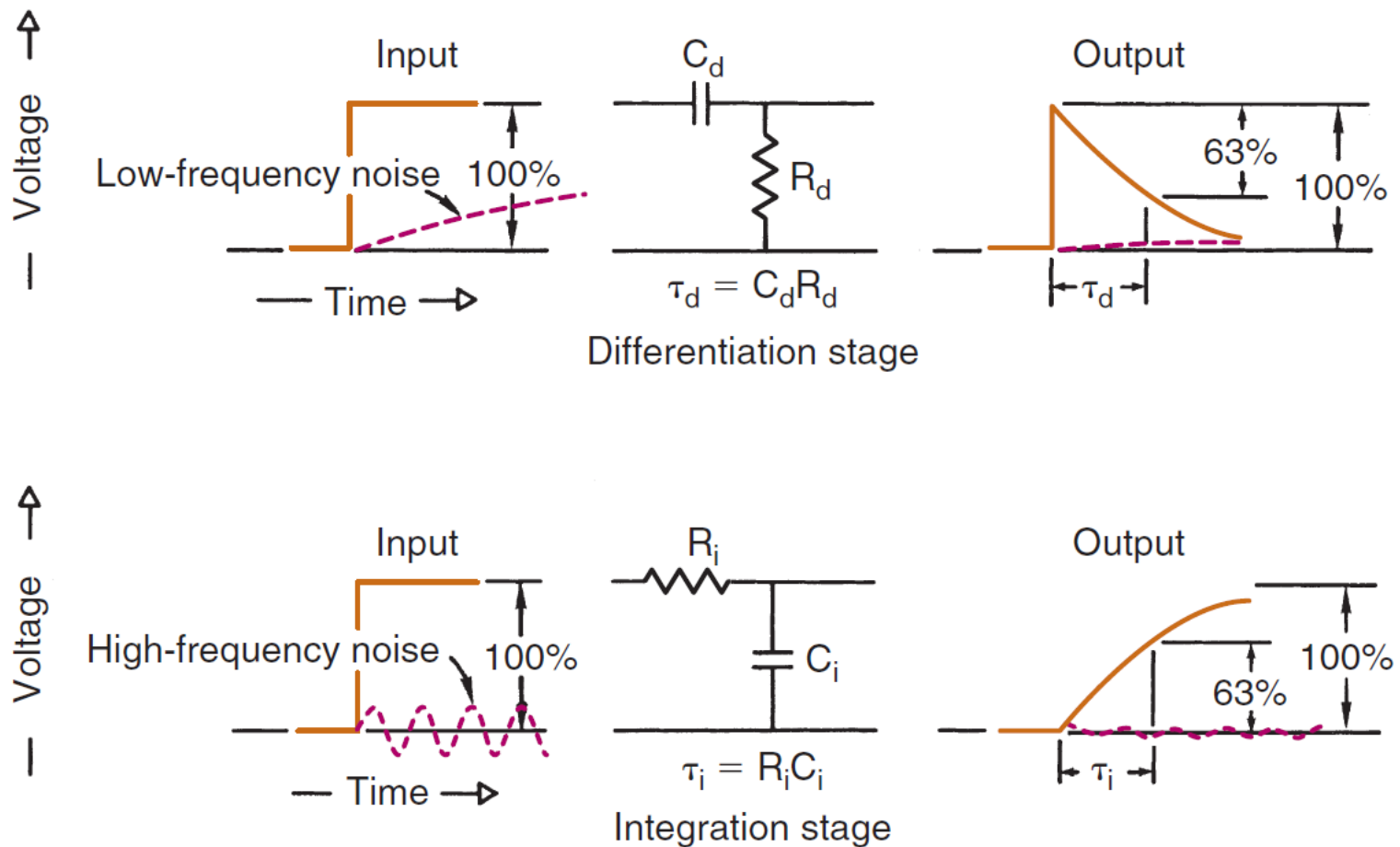


El amplificador.

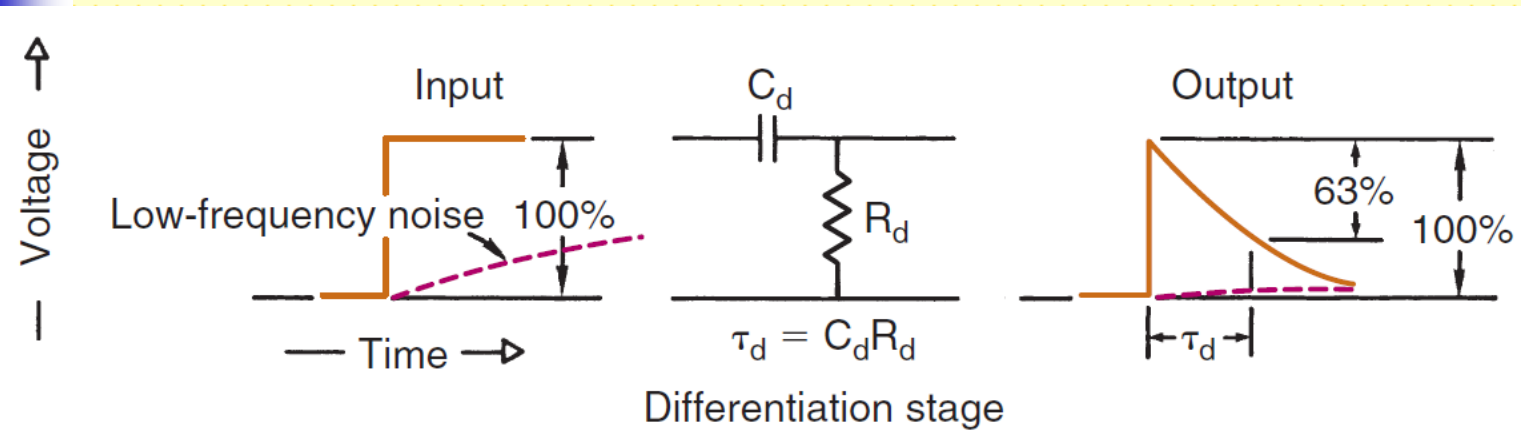
Una función adicional del circuito de conformación de pulsos es discriminar contra señales y ruido electrónico.

Los métodos más comunes para la conformación de pulsos son circuitos RC-Gaussiana (conformación RC), y métodos de retardo. Describiremos los conceptos básicos y principios del primero.

El amplificador.



El amplificador.



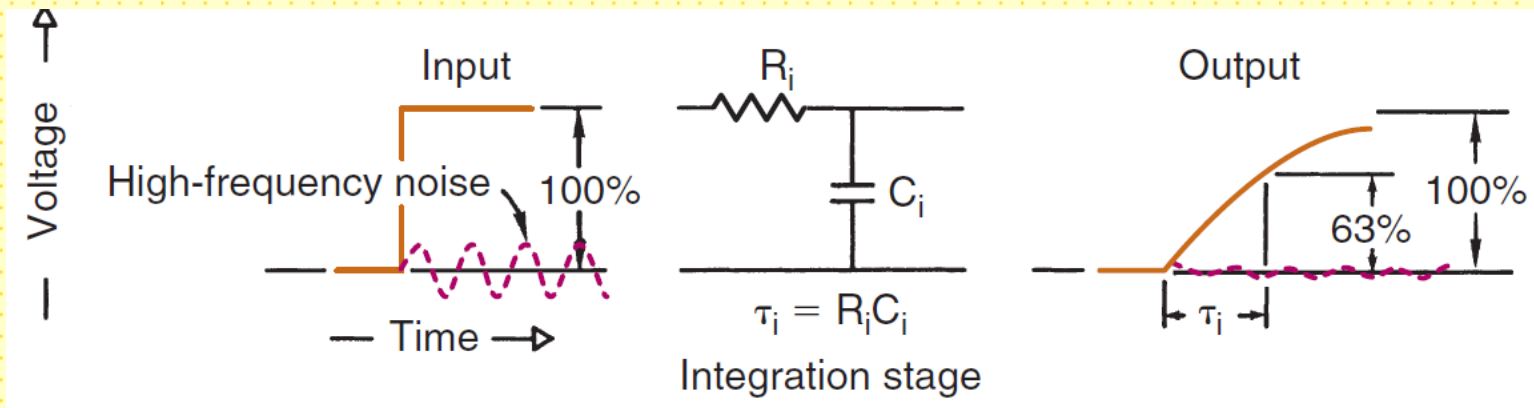
Cuando un pulso de rápido crecimiento y relativamente larga duración (pulso de salida del preamplificador) llega al amplificador el circuito de diferenciación da un pulso de rápido crecimiento que decae con una constante de tiempo τ_d

La amplitud del pulso de salida depende de la amplitud de la porción ascendente del pulso de entrada y es insensible a la "cola" de cualquier pulso precedente.

Este circuito de diferenciación discrimina el ruido de baja frecuencia.

Comentario: el circuito de diferenciación RC también es utilizado para dar forma al pulso en el preamplificador. La constante de tiempo es mucho más larga.

El amplificador.



Circuito de integración.

Cuando un pulso de rápido crecimiento «ingresa» al circuito, La salida es un pulso dado por:

$$V_o(t) = V_i(1 - e^{-t/RC})$$

Este circuito de integración discrimina el ruido de alta frecuencia.

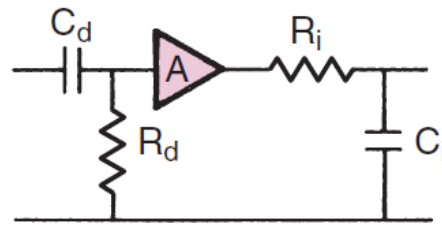
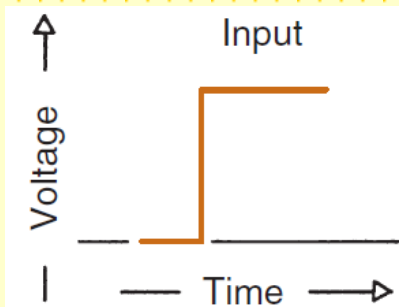
El amplificador.

Se obtienen circuitos de conformación de pulsos combinando etapas de diferenciación e integración.

Circuito de diferenciación e integración.

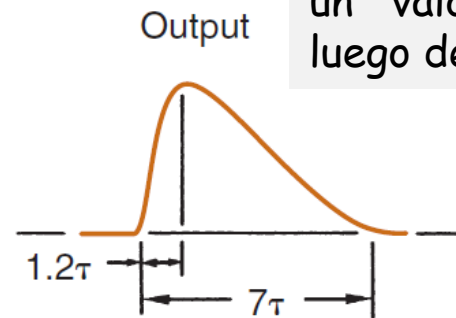
Salida unipolar.

Si $\tau = \tau_i = \tau_d$, la salida tiene un valor máximo en $t=1.2\tau$ y luego decae a 0 en unos 7τ .



$$\tau_d = C_d R_d = \tau_i = R_i C_i$$

Differentiation plus integration



Ligera caída por debajo de 0 al final del pulso.

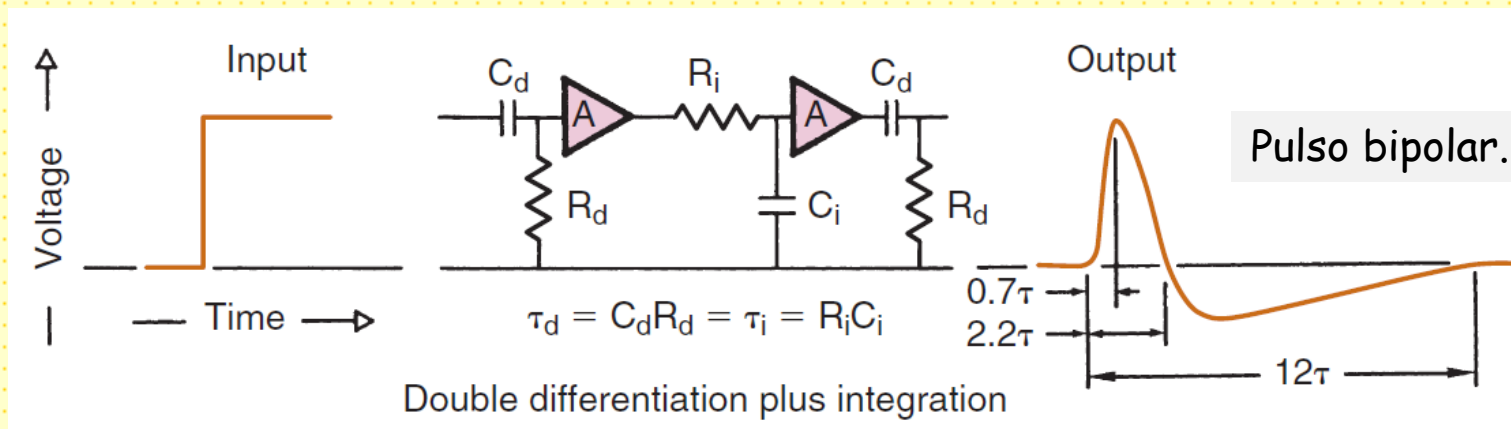
La amplitud máxima queda determinado por la amplitud del pulso de entrada.

Centelladores y semiconductores: $\tau \sim 0.25-5.0 \mu s$ (pulso de entrada de $50-500 \mu s$).
Adecuado para aplicaciones con alta tasa de conteo.

El amplificador.

Circuito de doble diferenciación.

Si $\tau = \tau_i = \tau_d$, la salida tiene un rise time mas corto y una duración mayor que la salida unipolar.
Valor máximo en $t=0.7\tau$, cero en $t=2.2\tau$ y luego decae a 0 en unos 12τ .



Se prefieren los pulsos unipolares cuando se requiere una baja relación señal ruido y cuando la resolución de energía es importante.

Se prefieren los pulsos bipolares para aplicaciones con alta tasa de contaje.



El amplificador.

Los amplificadores en general poseen un ajuste para el shaping time.

Constantes de tiempo más larga proporcionan mejor información de amplitud de pulso y son preferibles en aplicaciones que requieren óptima resolución de energía.

Se prefieren constantes de tiempo más cortas en aplicaciones que requieren alta resolución temporal o altas tasas de conteo, como la detección en coincidencia de los fotones de aniquilación de positrones.



El amplificador.

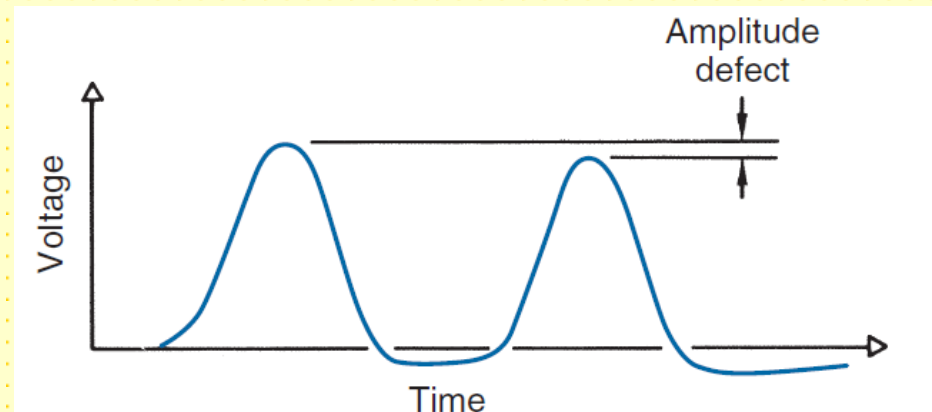
Problemas prácticos que ocurren en todos los amplificadores cuando la tasa de conteo es alta.

- Corrimiento de la línea de base.
- Efecto de suma de pulsos.

Corrimiento de la línea de base:

Originado por la componente negativa que se produce al final del pulso de salida unipolar del amplificador.

Un segundo pulso que se produce en un t del orden de 7τ tendrá una amplitud ligeramente menor.



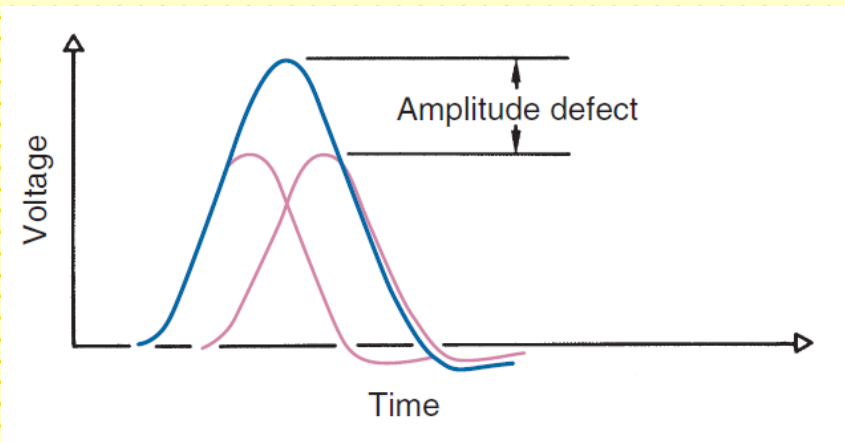
Esto se traducirá en una mala determinación (subestimación) de la energía depositada por la radiación. Se han desarrollado circuitos para minimizar este efecto y poder medir altas tasas de conteo.



El amplificador.

Suma de pulsos (pile-up).

A altas tasas de conteo, puede ocurrir que dos radiaciones lleguen tan junta que produzcan pulsos separados por una diferencia menor a la resolución temporal del sistema.



Cuando esto sucede los pulsos se suman y producen un único pulso con una amplitud que no es representativa de cualquiera de las originales.

El pulso acumulado distorsiona (sobrestima) la información de la energía y contribuye al tiempo muerto del sistema de detección.



El amplificador.

Tanto el cambio de línea de base como el impulso de pulsos pueden minimizarse disminuyendo el ancho del pulso del amplificador (τ).

Problema: acortando τ generalmente produce una relación señal/ruido pobre y baja resolución en energía (en general, todo lo que mejora la tasa de conteo degrada la resolución en energía).

La salida bipolar ayuda a evitar el corrimiento de la línea de base, permitiendo una buena determinación de la altura del pulso a altas tasas de conteo.

Esta configuración es usada en detectores centelladores de NaI(Tl).

Constantes de tiempo «cortas» (0.025-0.5 μ s) se emplean en estos sistemas con estos detectores. La resolución en energía (relativamente pobre) de los detectores de NaI(Tl) no es significativamente afectada, permitiendo una alta capacidad de tasa de conteo.

Los detectores semiconductores por lo general requieren amplificadores mucho más sofisticados,

Pulso unipolar, constantes de tiempo más largas ((0.5-8 μ s), y circuitos para estabilizar La línea de base manteniendo su excepcional resolución en energía a altas tasas de conteo.



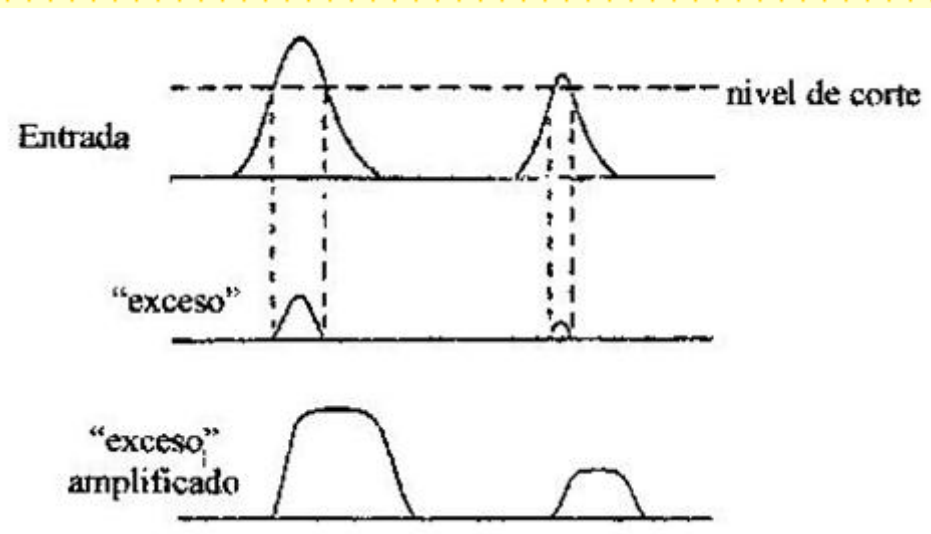
El amplificador.

Existe un amplificador con una función distinta, el llamado **amplificador biased**.

El propósito de este es amplificar una cierta porción de una señal lineal. Particularmente útil cuando se requiere expandir una región del espectro para un análisis en detalle.

El amplificador biased posee un nivel de corte variable: todos los pulsos por debajo de este nivel son descartados, mientras que a los pulsos que se encuentran por encima de este valor le resta el nivel de corte.

Por lo tanto, sólo los pulsos que exceden el nivel son aceptados.
El exceso es luego amplificado.





Analizador de alturas de pulso.

Cuando se utiliza un detector sensible a la energía (NaI (TI); semiconductor, etc.), la amplitud del pulso de voltaje de salida del amplificador es proporcional a la cantidad de energía depositada en el detector por la radiación incidente.

Analizando las amplitudes de los pulsos de salida del amplificador es posible determinar las energías de las radiaciones incidentes.

El análisis selectivo de pulsos dentro de un cierto rango de amplitud permite restringir el conteo a un rango de energía determinado, desechando el fondo, pulsos asociados a partículas dispersadas u otras energías fuera del rango de energía de interés.

Un dispositivo utilizado para este propósito es el **analizador de altura de pulso (PHA)**.



Analizador de alturas de pulso.

Se utiliza el PHA para contar sólo aquellos pulsos de salida del amplificador que corresponden a los intervalos de voltaje seleccionados o "canales".

Si esto es hecho para un solo canal o altura de pulso, el dispositivo se llama **analizador monocanal (SCA)**.

Un dispositivo que es capaz de analizar simultáneamente muchos intervalos de voltajes o canales diferentes se llama

analizador multicanal (MCA).



Analizador de alturas de pulso.

El analizador monocanal (SCA).

El SCA se usa para seleccionar sólo los pulsos del amplificador que caen dentro de UN rango de amplitud de voltaje seleccionado.

La amplitud del voltaje es proporcional a la energía de radiación depositada en el detector, por lo que este procedimiento es equivalente a seleccionar un rango de energía para el conteo.

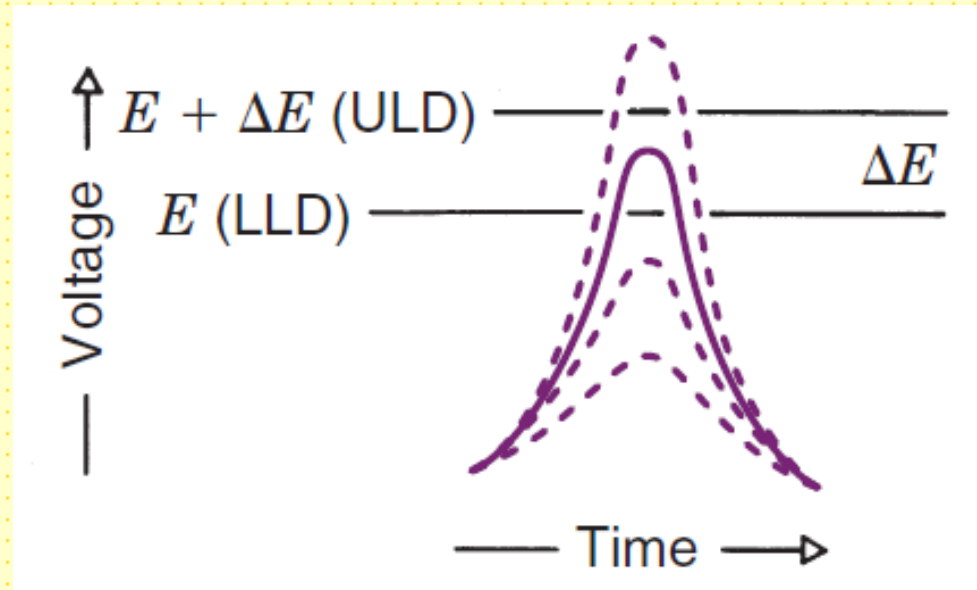
Los amplificadores modernos producen pulsos de salida con amplitudes en el rango **0-10 V**.

Por lo tanto la selección de voltaje proporcionado por la mayoría de los SCA también está en el rango **0-10 V**.

Analizador de alturas de pulso.

Un SCA tiene tres componentes básicos:

- Un nivel inferior de discriminación (LLD),
- Un nivel superior de discriminación (ULD),
- Un circuito de anticoincidencias.



LLD: establece un amplitud de voltaje umbral V (o energía E) para contar.

ULD: establece un voltaje (energía) límite superior $V + \Delta V$ (o $E + \Delta E$).

ΔV (o ΔE): ancho de la ventana.

Los voltajes de LLD y ULD se seleccionan en función del estudio a realizar.

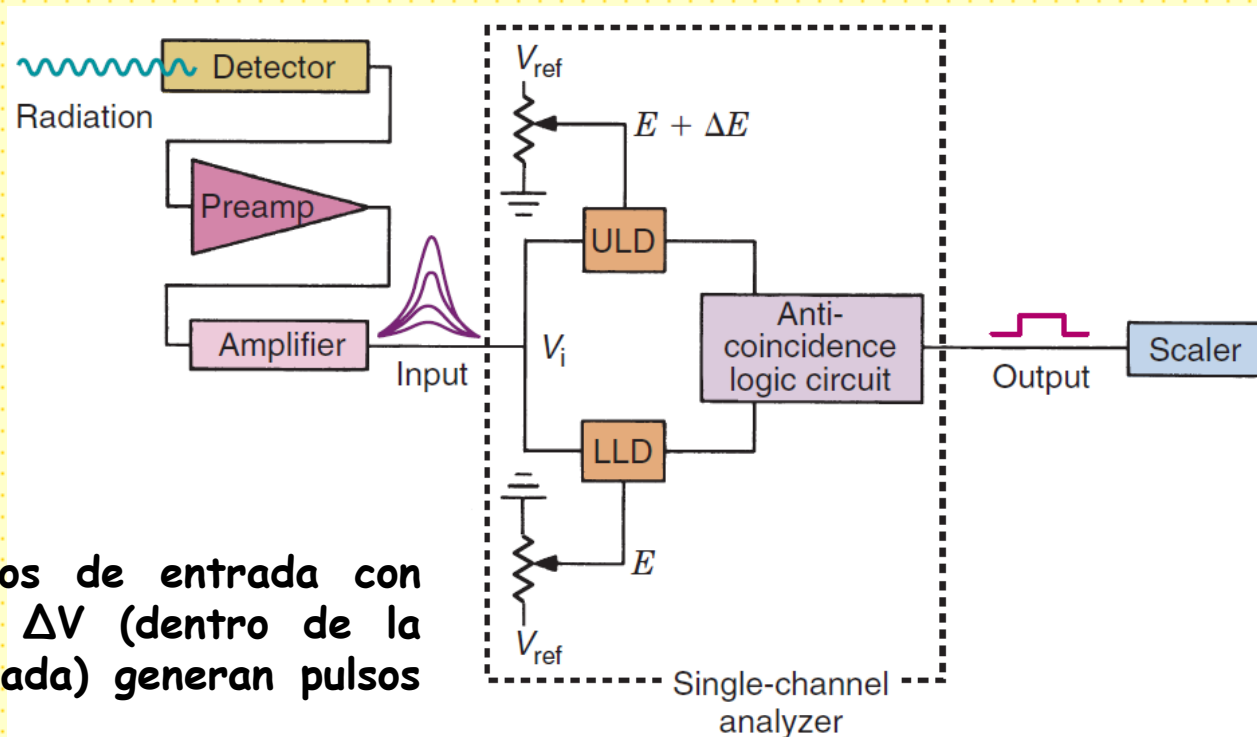
Analizador de alturas de pulso.

El LLD y el ULD establecen niveles de voltaje en circuitos llamados **comparadores**. Comparan la amplitud de un pulso de entrada con el LLD. Y el ULD. Producen una salida LÓGICA sólo cuando se excedan estos voltajes.

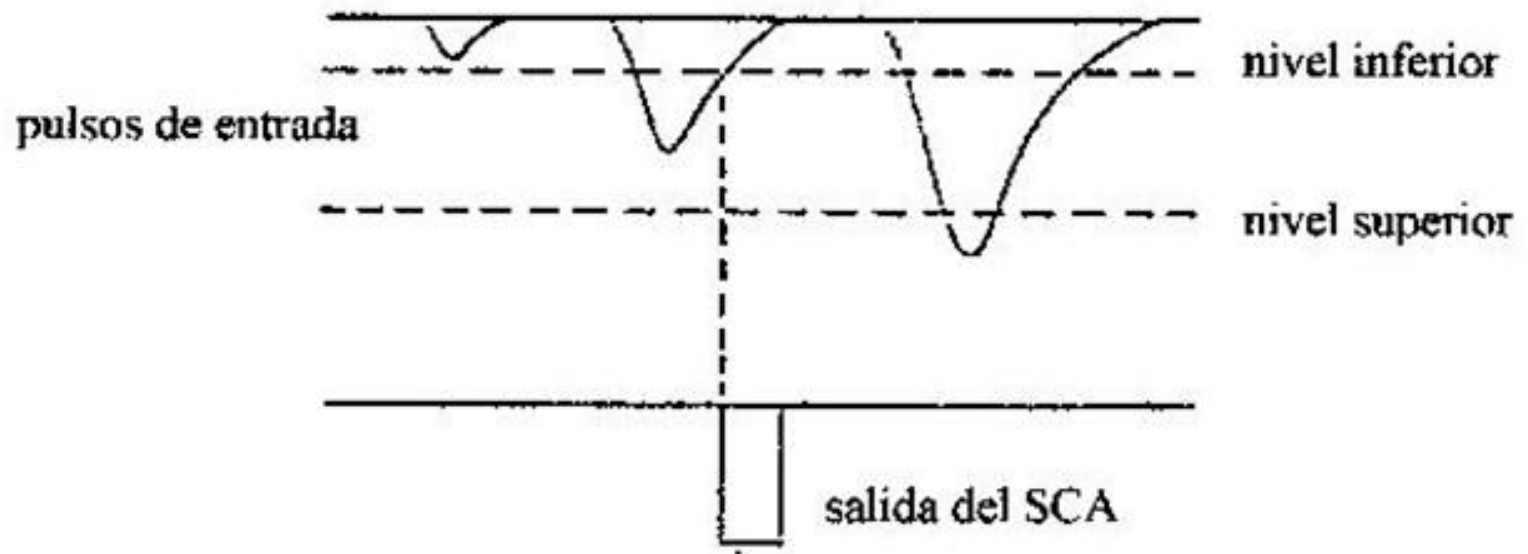
Los pulsos de los comparadores son enviados al circuito de anticoincidencia.

El circuito de anticoincidencia produce un pulso LÓGICO de salida cuando:
LLD está presente y NO está ULD.

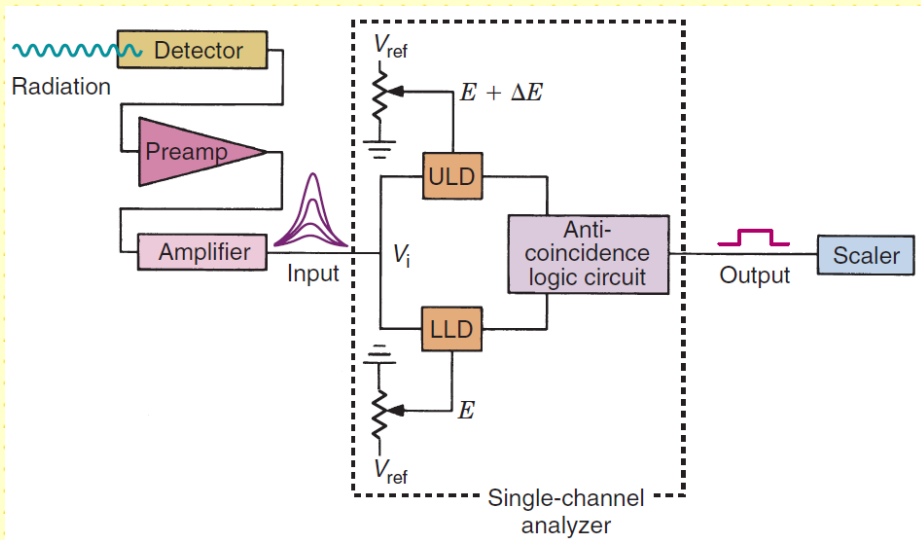
Por lo tanto, sólo los pulsos de entrada con amplitudes entre V y $V + \Delta V$ (dentro de la ventana de energía seleccionada) generan pulsos de salida desde el SCA.



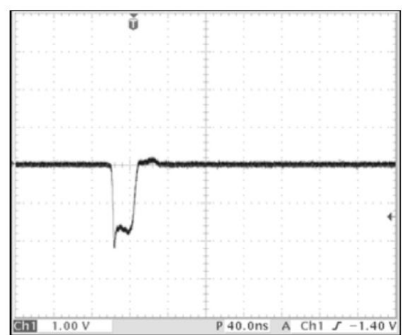
Analizador de alturas de pulso.



Analizador de alturas de pulso.



Los pulsos de salida lógicos del SCA alimentan circuitos contadores.



Recordar: los pulsos de salida del SCA son todos de la misma amplitud y forma (típicamente 4 V de amplitud, 1 μ s de duración). Sus amplitudes no contienen información sobre la radiación incidente, porque esta información ya ha sido extraído por el SCA (sólo «informan» que ha llegado una radiación con la energía de interés).



Analizador de alturas de pulso.

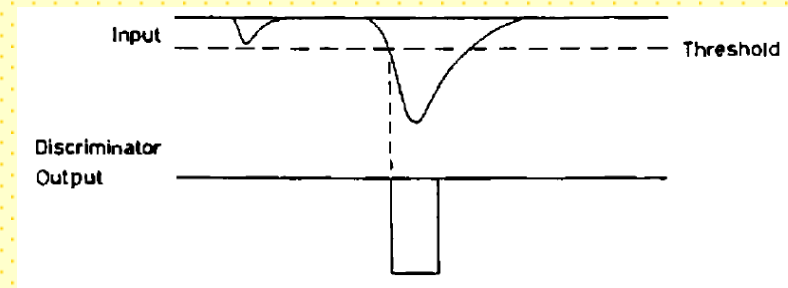
Un SCA tiene tres modos de operación:

Modo normal: En este modo, los niveles superiores e inferiores pueden ajustarse independientemente uno de otro.

La posición del nivel superior no se ve afectada por la del inferior. Cuidado: no colocar el nivel inferior por encima del superior.

Modo ventana: Una vez elegido el nivel inferior, con el superior se establece el ancho de la ventana. Si se mueve el nivel inferior, el superior se mueve solidario con este, manteniendo el ancho de la ventana.

Modo integral: El nivel superior no existe. El SCA se comporta como un discriminador, con un único nivel (el inferior) ajustable. Se emplea para eliminar o reducir el ruido electrónico.



Analizador de alturas de pulso.

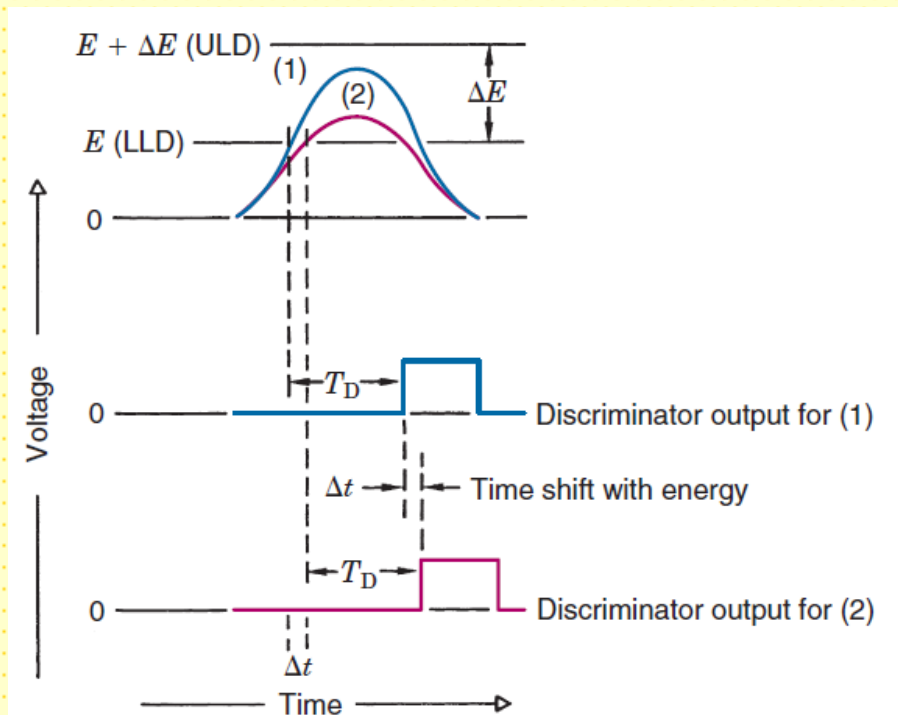
Aplicaciones temporales con el SCA.

En muchas aplicaciones es fundamental determinar con precisión el momento de detección de un pulso o la diferencia temporal entre dos pulsos. Ejemplo: tomografía de aniquilación de positrones.

La mayoría de los SCA utilizados en Medicina Nuclear determinan estas diferencias a partir del método del borde frontal.

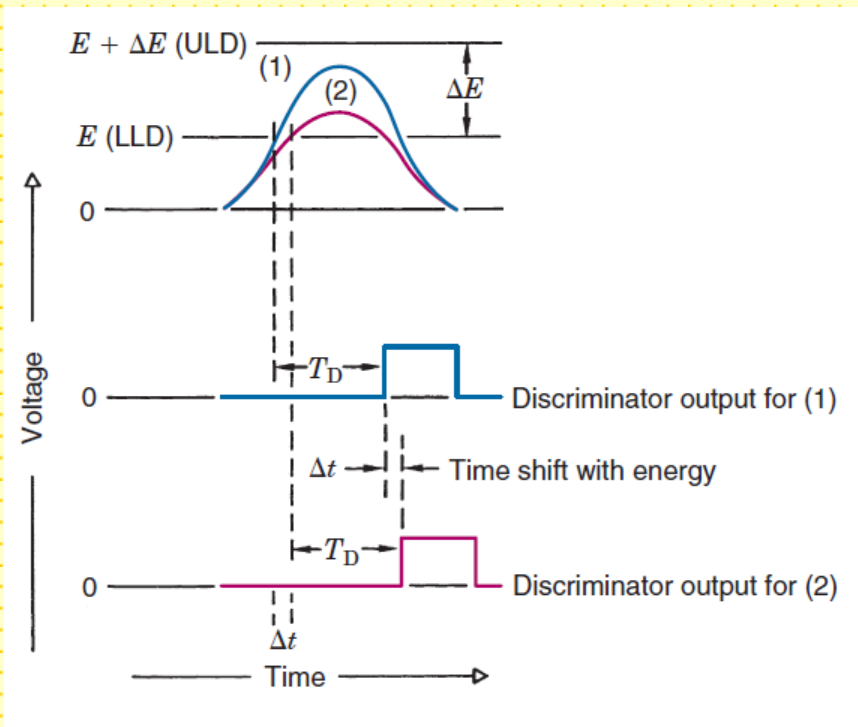
El SCA da un pulso de salida lógico un tiempo fijo T_D luego de que la altura del borde frontal supera el LLD (El pulso de entrada «dispara» el LLD).

Este método es adecuado para muchas aplicaciones; Sin embargo, tiene un problema.



Analizador de alturas de pulso.

El momento del disparo depende de la amplitud del pulso de entrada, pulso depende de la amplitud de la entrada.



Pulsos que llegaron simultáneamente presentan un desfase espurio Δt .

Esta diferencia puede ser de 5 a 50 ns para un detector de NaI(Tl) acoplado a un tubo FM.

«timing walk»

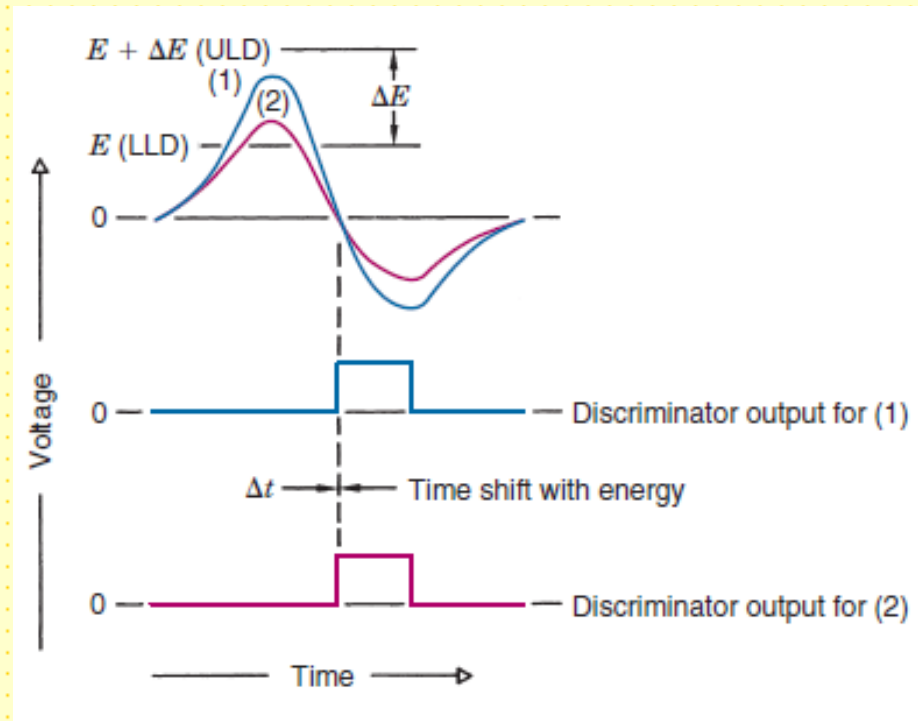
Analizador de alturas de pulso.

Solución: técnicas de electrónica rápida.

Un método es el «tiempo de cruce de cero». Requiere pulsos de entrada al SCA bipolares.

El pulso de salida se dispara cuando el pulso cambia de positivo a negativo.

Este método es mucho menos sensible a la amplitud del pulso de entrada y puede proporcionar una precisión de ± 4 ns con detectores de NaI (TI) acoplados a tubos FM.



Analizador multicanal.

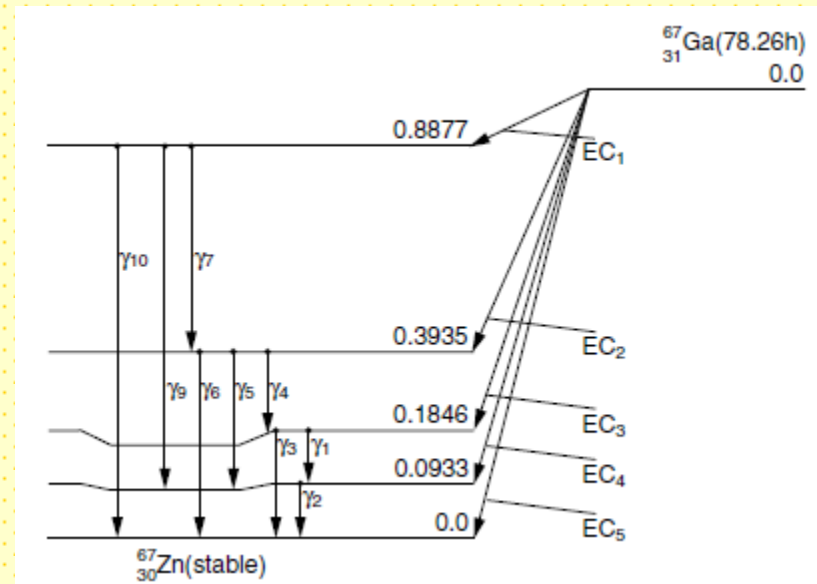
Algunas aplicaciones requieren el estudio simultáneo de eventos asociados a ventanas de voltaje o energía múltiples.

Por ejemplo, algunos dispositivos de imagen tienen dos o tres SCA's independientes para registrar simultáneamente los múltiples rayos γ emitidos por nucleidos tales como el ^{67}Ga .

Este enfoque no es satisfactorio cuando se requieren decenas o incluso miles de ventanas diferentes.

Ejemplo: espectroscopía γ , donde se registran todos los rayos en un rango continuo de 0 a 2 MeV.

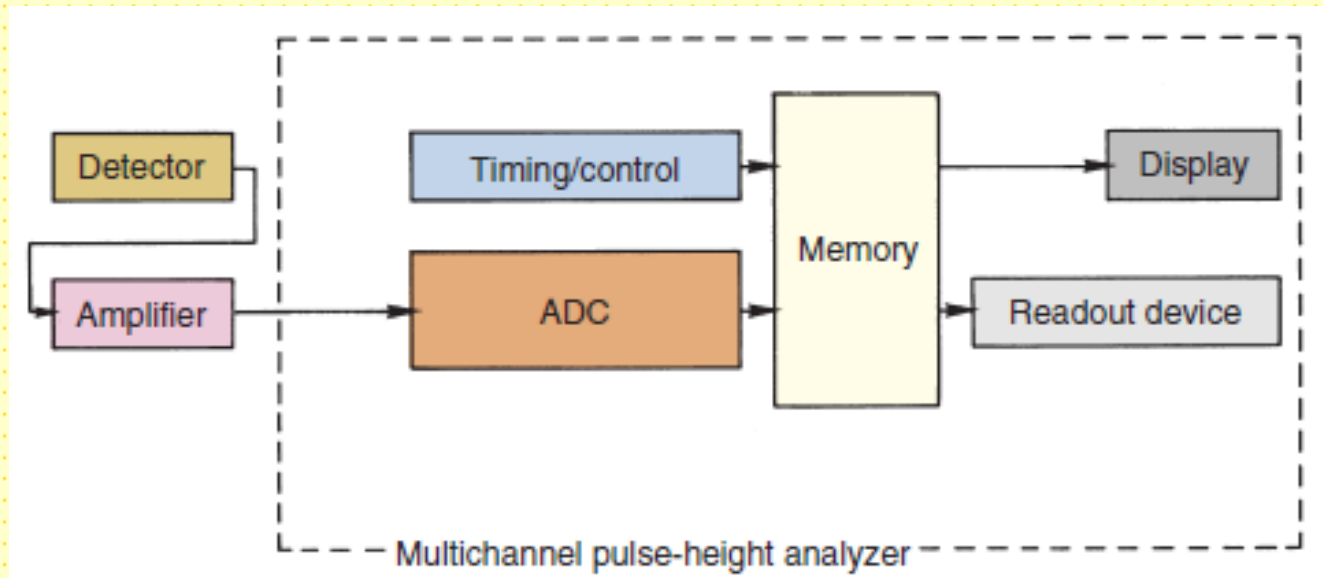
Se necesitarían cientos o miles de SCA's (son caros) y el ajuste y estabilidad de las múltiples ventanas sería tedioso y complicado.





Analizador multicanal.

Solución: el analizador multicanal (MCA).

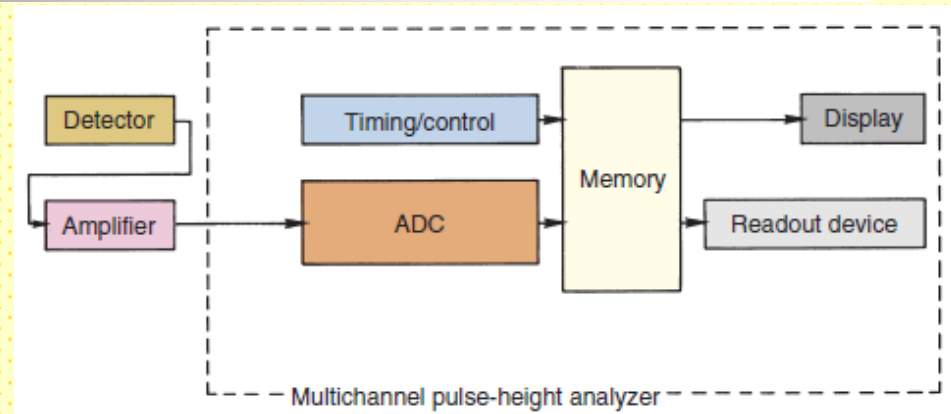


El corazón del MCA es un convertidor analógico a digital, que mide y separa los pulsos entrantes según sus amplitudes.

Analizador multicanal.

El rango (continuo) de amplitud de los pulsos de salida del amplificador es 0-10 V

El ADC divide este rango continuo en un número finito de intervalos discretos:
canales.



El número de canales puede variar desde 100 en pequeños analizadores hasta 65,536 (2^{16}) en sistemas complejos.

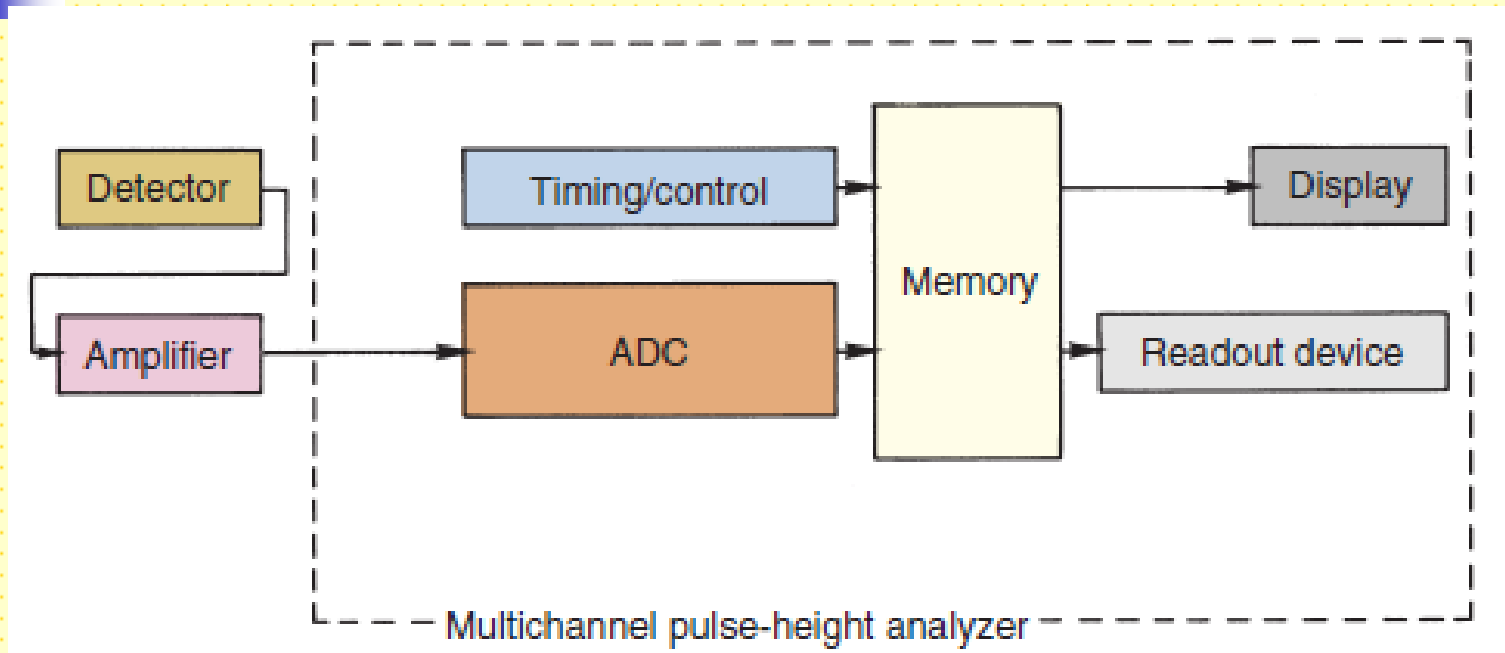
El ADC en un analizador de 1000 canales divide el rango de amplitudes de 10 V en 1000 canales cada uno de $10 \text{ V}/1000 = 0.01 \text{ V}$ de «ancho»:

0-0.01 V → canal 1

0.01-0.02V → canal 2

y así sucesivamente.

Analizador multicanal.



El ADC convierte una señal analógica (V, amplitud de pulso, un número esencialmente infinito de posibles valores), en uno digital (número de canal), que tiene un número finito de valores enteros .



Analizador multicanal.

Para cada canal del MCA hay una ubicación de almacenamiento correspondiente en la memoria del MCA.

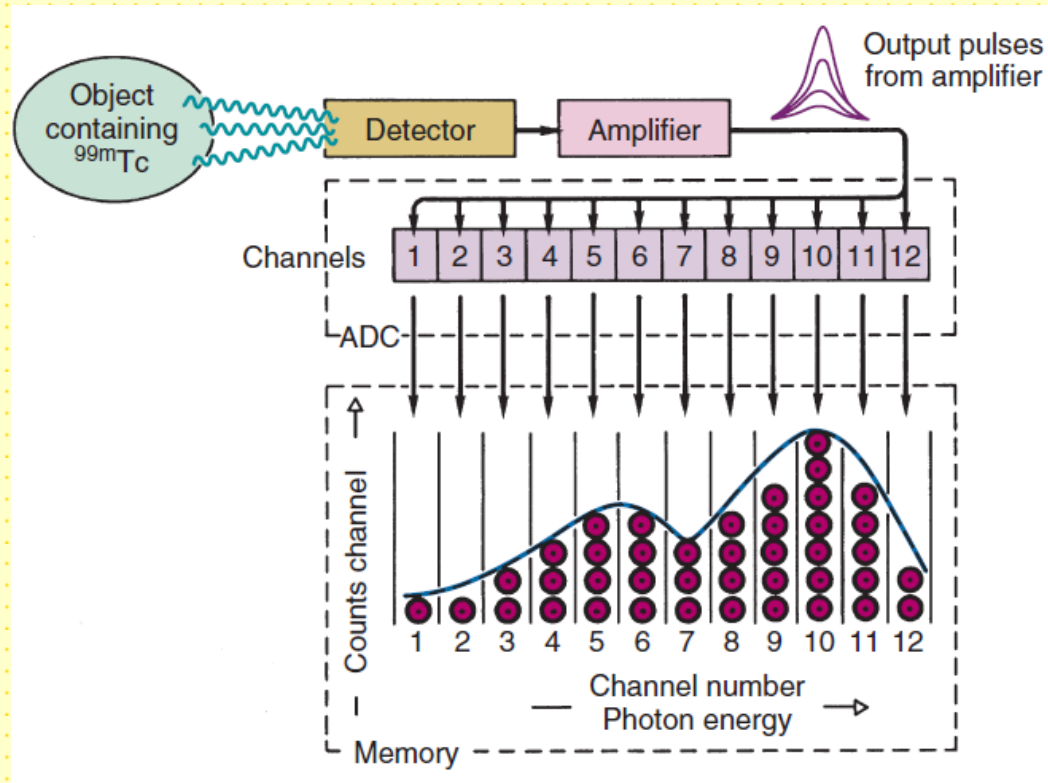
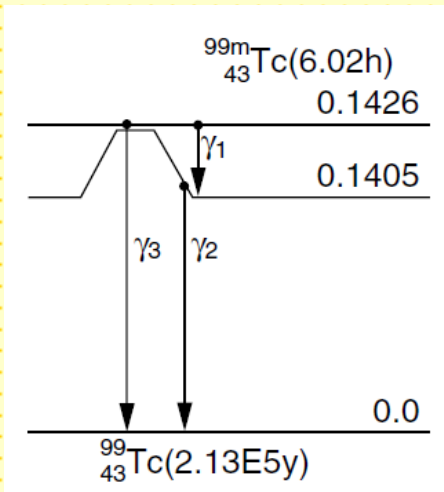
La memoria del MCA cuenta y almacena el número de pulsos registrados en cada canal. El número de memorias de almacenamiento disponibles determina entonces el número de Canales de MCA.

El MCA se utilizan para determinar el espectro de altura de pulsos (cuentas por canal versus número de canal).

Como el número de canal es proporcional a la altura del pulso, y este a la energía depositada por la radiación en el detector, el canal es proporcional a la energía.

Para «traducir de canales a energías: calibración en energías (ya lo veremos).

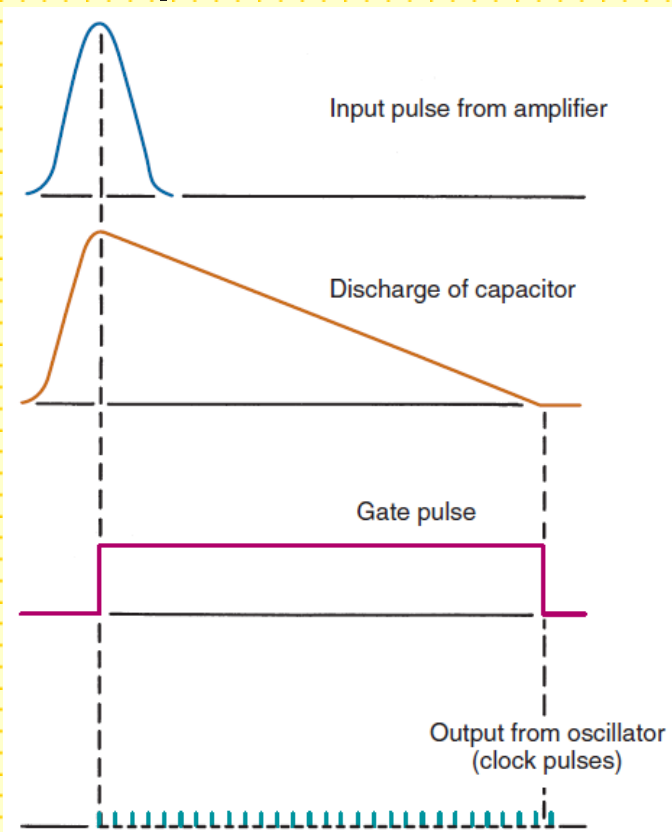
Analizador multicanal.



Dos tipos de esquemas para el ADC se usan comúnmente en Medicina Nuclear:

- Convertidor de Wilkinson (o rampa).
- Aproximaciones sucesivas.

Analizador multicanal.



El pulso de entrada contiene una cantidad de carga que carga un capacitor a la entrada del capacitor.

El capacitor se descarga a través de una resistencia con una constante de tiempo RC relativamente larga.

Al empezar la descarga un pulso de entrada dispara un reloj que produce pulsos que se cuentan en un circuito de conteo.

Cuando el capacitor se descargó el pulso de entrada termina y apaga el reloj y termina el conteo.

El número de pulsos queda determinado por la descarga del capacitor, que está determinado por la carga entregada por el pulso, que depende de energía depositada en el detector.

Los circuitos de control del MCA incrementan en una cuenta el canal de memoria correspondiente al número de pulsos, luego borra los circuitos de entrada y prepara el MCA para aceptar la siguiente entrada.



Analizador multicanal.

En ADC de aproximación sucesiva (SA), La digitalización se produce comparando la amplitud de pulso con una secuencia seleccionada de niveles de voltaje.

Primer nivel de comparación: mitad de la escala máxima.

Si la amplitud del pulso es mayor que este nivel, el primer "bit" digital se establece en "1"; Si no, se establece en "0".

Segunda comparación: el voltaje de comparación es aumentado o disminuido al 25% o 75%, dependiendo de si la amplitud del pulso superó o no el inicial.

La comparación se repite y el segundo bit digital se registra como "1" o "0».

A través de varios pasos, en cada uno disminuyendo o incrementado el voltaje a la mitad, se obtiene un conjunto de bits para la amplitud del pulso de entrada.



Analizador multicanal.

En ambos casos la salida es un número binario entre 0 y 2^n .

El valor de n determina el número de canales digitales posibles en que la amplitud de pulso de entrada se puede convertir.

Ejemplo, convertidor de 8 bits. $n = 8$.

Divide el rango de entrada en 256 canales digitales ($2^8 = 256$)

Convertidor de 10 bits: 1024 canales digitales.

Y así sucesivamente.

Cuanto mayor sea el número de bits, más precisamente el ADC puede determinar la amplitud del pulso.

Convertidor de 8 bits puede determinar la amplitud con una precisión de una parte en 256

Convertidor de 10 bits, una parte en 1024

y así sucesivamente.



Analizador multicanal.

Cuidado: a mayor bits, mayor precisión, pero: el proceso de conversión digital requiere tiempo. A mas bits (canales) mas tiempo y es necesaria mayor espacio de almacenamiento informático.

Ejemplo: Para un ADC de 10 bits (1024 canales) con un reloj de 100 MHz, el tiempo de descarga del condensador requerido para un evento en el canal 1000 es $1000 \text{ pulsos}/10^8 \text{ pulso/s} = 10^{-5} \text{ s} = 10 \mu\text{s}$.

Para un convertidor SA, se necesita tiempo para cada una de las comparaciones de voltaje.

La mayoría de los estudios en Medicina Nuclear se pueden realizar con convertidores de 8 bits, pero de 10 y de 12 bits también se utilizan para situaciones en la que la precisión es esencial (ejemplo: espectroscopia de energía de alta resolución con detectores semiconductores)



Analizador multicanal.

Además del proceso de conversión, el ADC consume tiempo para incrementar una unidad en la memoria correspondiente, resetear el contador de pulsos, etc. El ADC puede ser un «cuello de botella» en un sistema detector.

Las unidades ADC modernos pueden digitalizar eventos a tasas de 1 millón de cuentas/s. Por lo tanto el ADC en general no es un factor limitante para las aplicaciones con detectores NaI(Tl). La limitación temporal está dada por el tiempo de decaimiento del centellador.



Convertidores de tiempo en amplitud (TAC).

Veamos como obtener ahora (en lugar de la distribución de energías) la distribución de tiempos entre eventos.

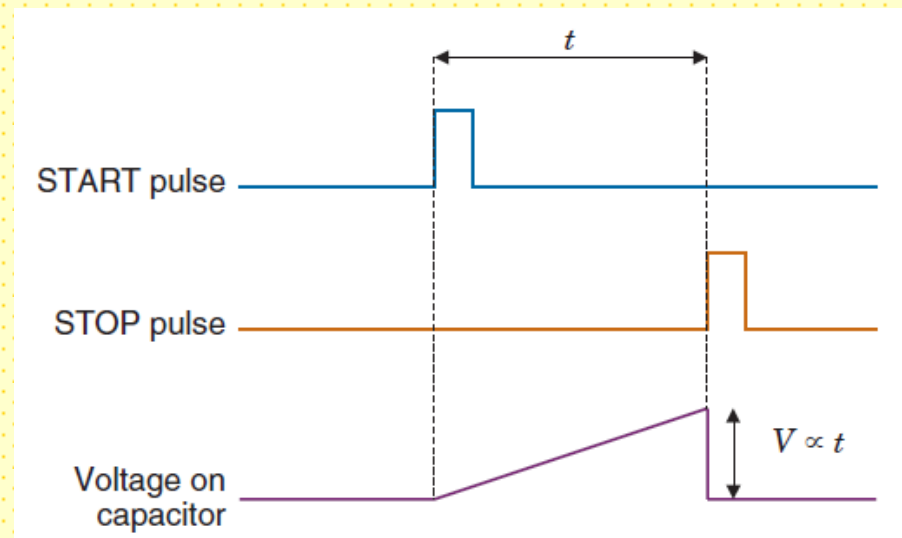
El convertidor de tiempo a amplitud (TAC) Produce una señal de salida cuya amplitud es proporcional diferencia temporal entre dos pulsos lógicos suministrados a la entrada del TAC.

Los pulsos lógicos generalmente provienen de la salida de un SCA asociado a un detector de radiación.

Convertidores de tiempo en amplitud (TAC).

El primer pulso lógico (START) se usa para iniciar la carga de un capacitor por una fuente de corriente constante.

La segunda señal lógica (STOP) se usa para terminar la carga del capacitor.



Como el capacitor se carga con una corriente constante, el voltaje en el capacitor aumenta linealmente con el tiempo y por lo tanto su amplitud final es proporcional al intervalo de tiempo entre las señales START y STOP.

El pulso de salida del TAC es leído por el MCA y construye un espectro de altura de pulsos. Ahora el canal representa tiempo en lugar de energía.



Contadores.

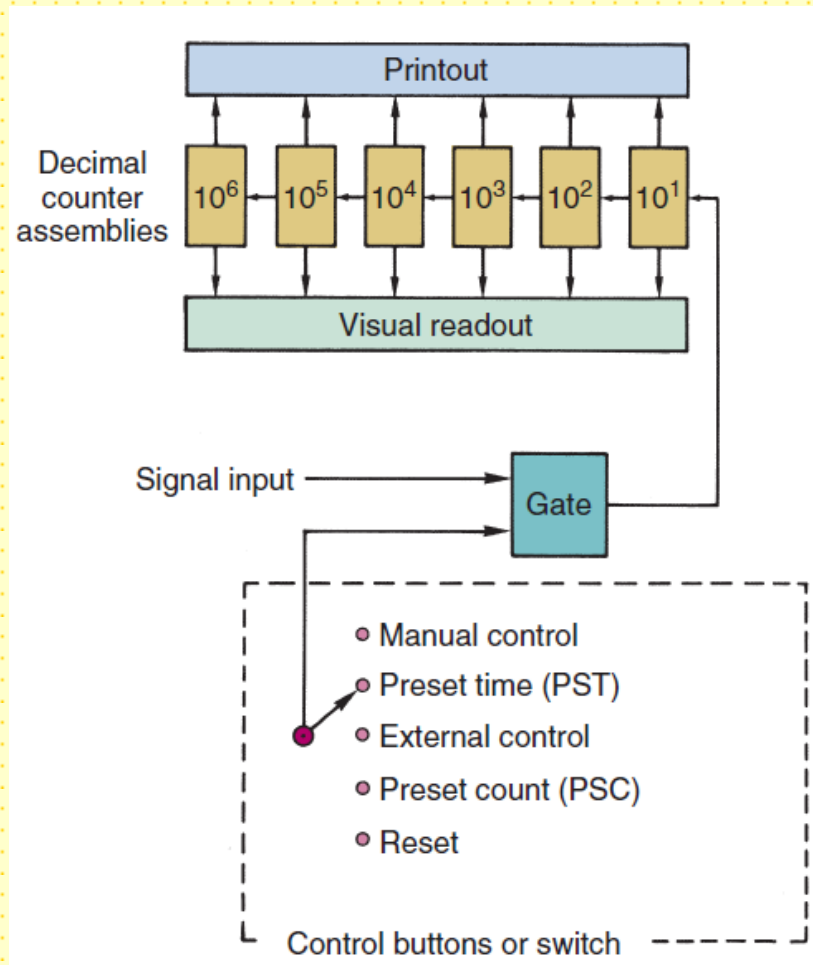
Los contadores digitales se utilizan para contar las señales de salida después del procesamiento de las mismas.

Un dispositivo que sólo cuenta los pulsos se llama contador.

Un dispositivo que maneja el tiempo de conteo es un temporizador.

Un dispositivo que cuenta pulsos y maneja el tiempo de conteo es un contador escalímetro.

Contadores.



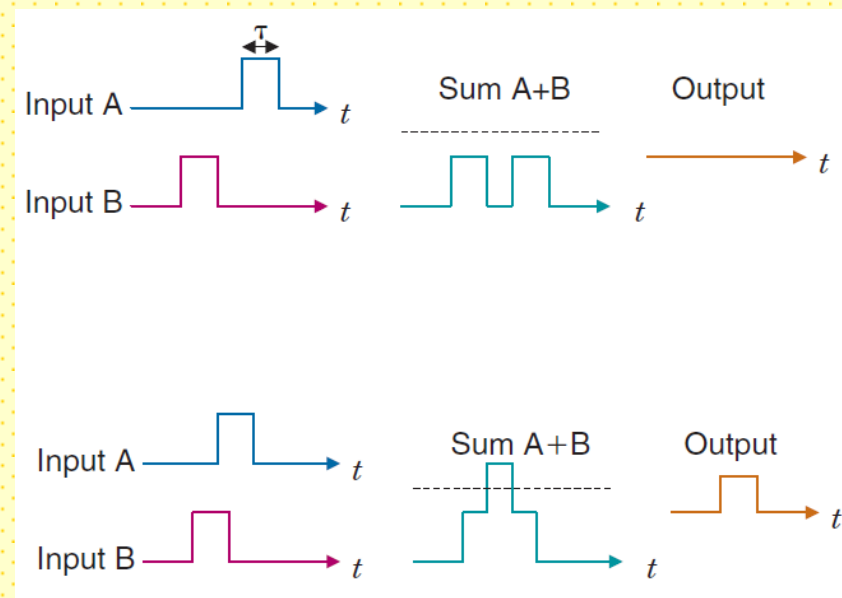


Unidad de coincidencias.

Unidades lógicas que producen un pulso sólo si dos o más pulsos de entrada llegan a la unidad dentro de una ventana de tiempo particular.

Un método para hacer esto es sumar los pulsos de entrada y el resultado hacerlo pasar por un discriminador cuyo nivel de corte se establece justo por debajo de la amplitud que se obtendría si se sumara la amplitud de ambos pulsos.

La unidad genera un pulso de salida sólo cuando dos (o más) pulsos se superponen en el tiempo y se ha sobrepasado el umbral del discriminador.



La ventana de tiempo de la coincidencia es el intervalo de tiempo máximo entre dos pulsos para que sean contados como coincidencia. En este ejemplo, el doble del ancho de los pulsos de entrada (2τ).