



Medición de pulsos tardíos en las señales de tubos fotomultiplicadores del tipo malla fina utilizados en un detector de radiación

Lucía Pedraza^a, Rubén Alfaro^a, Andrés Sandoval^a, Ernesto Belmont^a,

^aInstituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, jed_ia@yahoo.com,
ruben@fisica.unam.mx, sandoval@fisica.unam.mx, belmont@fisica.unam.mx

RESUMEN:

Los pulsos tardíos (AP's por sus siglas en inglés) son un tipo de ruido que está siempre presente en las señales de los tubos fotomultiplicadores (PMT's por sus siglas en inglés) y su origen se asocia principalmente a la ionización de los gases residuales que existen dentro de los PMT's. Se presentan los resultados de una prueba realizada para estudiar los AP's en los PMT's del detector V0A que forma parte del detector V0 del experimento ALICE (A Large Ion Collider Experiment) del LHC (Large Hadron Collider). La función principal del detector V0 es generar una señal de disparo para iniciar la toma de adquisición de datos cuando ocurre una colisión entre protones o núcleos de iones pesados. La presencia de pulsos tardíos en los PMT's puede producir eventos falsos cuando un pulso tardío de una colisión previa se registra como una señal nueva. El objetivo principal de éste trabajo es estudiar el origen, amplitud, tiempo y tasa de los AP's en las señales de los tubos fotomultiplicadores del detector V0A y encontrar un umbral de discriminación que permita reducirlos. Para el estudio se utilizó un módulo de digitalización FADC (Flash Analog to Digital Converter), que permitió estudiar los pulsos en una ventana temporal de 1 μ s. Se mostró que la tasa de AP's aumenta con el incremento del alto voltaje y pueden reducirse fijando un umbral de discriminación, teniendo cuidado de no reducir la eficiencia de detección. Asimismo se encontró la existencia de más de una componente en la distribución temporal de AP's, con lo cual podemos asociar el gas residual como origen de los AP's. Concluimos que cada fotomultiplicador debe ser medido individualmente para poder realizar un balance entre el voltaje de operación y el nivel de discriminación, minimizando el número de pulsos tardíos y maximizando la ganancia.

1. INTRODUCCIÓN

El LHC es un sincrotrón de hadrones localizado en Francia y Suiza a 50 m bajo tierra aproximadamente y está formado por dos anillos de 26.7 km de circunferencia cada uno. Cada anillo acelerador (compuesto por secciones curvas y rectas) puede acelerar partículas (protones y iones pesados) en direcciones opuestas y hacerlas colisionar en cuatro puntos de intersección donde se encuentran grandes detectores, también llamados experimentos.

El experimento ALICE está formado por aproximadamente 18 subdetectores y está ubicado en Francia a 40 m bajo tierra. Mide 16 x 16 x 26 m³ y tiene un peso aproximado de 10,000 toneladas. ALICE está diseñado para explorar la física de interacciones fuertes en colisiones protón-protón, y el plasma de quarks y gluones en colisiones ion-ion. El detector consiste básicamente de un barril central, un espectrómetro de muones y un conjunto de detectores delanteros. Estos últimos son los encargados de disparar el trigger para la toma de adquisición de datos cuando ocurre una colisión. Uno de los detectores delanteros es el detector V0 formado por dos discos de plástico centellador V0A y V0C. El detector V0A fue construido en el año 2006 por el grupo experimental de Altas Energías del Instituto de Física de la UNAM y es un detector (junto con el V0C) que juega un papel central en ALICE. La figura 1 muestra los detectores de ALICE.

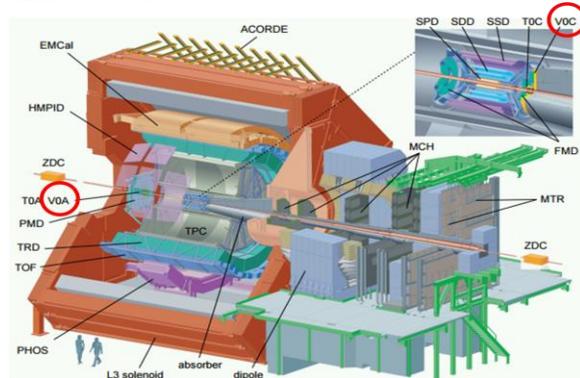


Figura 1. Subdetectores del experimento ALICE.

El detector V0 tiene varias funciones, entre ellas las más importantes son: generar un trigger cuando ocurre una colisión haz-haz, un trigger cuando ocurre una colisión haz-gas residual, y un trigger de centralidad y multiplicidad de la colisión. Además de esto se utiliza para medir la luminosidad del haz y para reconstruir el plano de reacción de la colisión.

El detector V0A está formado por dos hemisferios de plástico centellador que al unirse forman un disco de 82.4 cm de diámetro y 2.5 cm de espesor. El disco tiene en el centro un orificio circular de 86 mm de diámetro que permite el paso de la tubería del haz. El disco está dividido en ocho partes iguales llamadas *sectores* y en cuatro *anillos* concéntricos al orificio central, formando un total de 32 subdetectores individuales referidos como *celdas* o *pixeles*. La luz producida dentro de las celdas es recolectada por fibras corredoras de frecuencia que se encuentran embebidas dentro de ambas caras de cada celda centelladora. La luz es transferida a tubos fotomultiplicadores de malla fina colocados sobre el borde del soporte mecánico del detector. Las celdas están acopladas por fibras claras a un LED para calibrar el detector. Un diagrama del detector V0A se muestra en la figura 2.

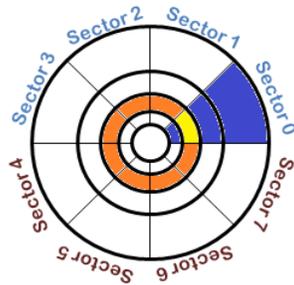


Figura 2. Anillos y sectores del detector V0A.

El tubo fotomultiplicador es un dispositivo que hace posible convertir pulsos de radiación en una señal eléctrica medible. Un diagrama de un PMT convencional se muestra en la figura 3. Los PMT's están formados por los siguientes cuatro elementos: (1) un fotocátodo que convierte la radiación en un flujo de electrones, (2) un sistema óptico y electrónico de entrada para enfocar y acelerar el flujo de electrones, (3) un sistema de multiplicación de electrones que consiste en una serie de electrodos llamados *dínodos*, que son emisores de electrones secundarios, y (4) un ánodo que recolecta el flujo de electrones y facilita una señal eléctrica medible (Flyckt y Marmonier, 2002).

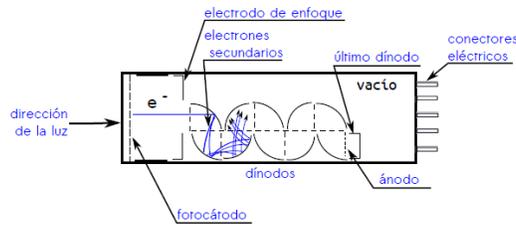


Figura 3. Esquema de la estructura general de un PMT convencional.

Los dínodos de los PMT's utilizados en el detector V0 son del tipo malla fina, estos consisten de planos paralelos de mallas colocadas unas sobre de otras con distancia de separación muy pequeñas, como se muestra en la figura 4. Estos fotomultiplicadores se caracterizan por ser casi inmunes a campos magnéticos intensos de hasta 1 T.

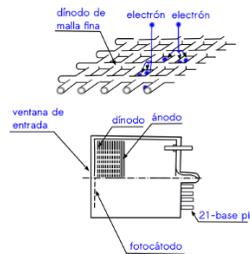


Figura 4. Esquema general de un PMT del tipo malla fina.

Es importante mencionar que la calibración del detector se hace normalmente con partículas de mínima ionización (MIP's por sus siglas en inglés). Las partículas relativistas interactúan con medios materiales principalmente por ionización. Cuando las partículas pierden la mínima energía por ionización se llaman MIP's.

Durante la operación de ALICE se observó la presencia de pulsos tardíos en las señales de los tubos fotomultiplicadores. Estos pulsos son señales espurias que pueden tener varias consecuencias durante la generación del trigger del V0. Los haces de partículas se cruzan cada 25 ns, con un cruce tan corto existe la posibilidad de que un pulso tardío de una colisión previa se registre como una nueva señal, lo que hace un veto falso o se desechan eventos buenos, haciendo que disminuya la eficiencia del detector V0.

El objetivo principal de éste trabajo es estudiar el origen, amplitud, tiempo y tasa de los pulsos tardíos en los tubos fotomultiplicadores del detector V0A y encontrar un umbral de discriminación que permita reducirlos.

2. TEORÍA

Los pulsos tardíos son un tipo de ruido que está siempre presente en las señales de los tubos fotomultiplicadores y se observan después del pulso principal. Se pueden dividir en dos categorías: pulsos tardíos con retraso corto y pulsos tardíos con retraso largo. Los primeros forman parte del pulso principal y se forman por la retrodispersión de los electrones en el primer dínodo de la cadena de multiplicación. Los electrones retrodispersados son decelerados por el campo eléctrico y vuelven a acelerar hacia el primer dínodo, produciendo electrones secundarios y generando un pulso retrasado (Akgun et al., 2008; Lubsandorzhev et al., 2000)



Los pulsos tardíos con retraso largo se originan por la ionización de gases residuales que se encuentran dentro de los fotomultiplicadores. El ion positivo formado en el proceso de ionización se mueve en dirección inversa a los electrones, algunos iones impactan sobre el fotocátodo y liberan electrones que son nuevamente acelerados y multiplicados, resultando un pulso retrasado de amplitud considerable. Como los iones positivos son relativamente lentos el tiempo que les toma regresar al fotocátodo es de cientos de nanosegundos a microsegundos, siendo el tiempo entre el pulso principal y el pulso tardío un tanto largo. De la ecuación de movimiento para un ion en un campo eléctrico $E = V/x$, el tiempo t que tarda un ion en viajar una distancia x es

$$t = \sqrt{\frac{2m}{qV}} x$$

donde m y q son la masa y la carga del ion respectivamente (Knoll, 2000; Coates, 1973).

La relación entre pulsos principales y pulsos tardíos está dada por la tasa de pulsos tardíos, expresada en porcentaje y definida como

$$\text{tasa de AP} = \frac{\# \text{ de eventos en la ventana temporal}}{\# \text{ total de eventos}} \times 100$$

Los pulsos tardíos se pueden reducir definiendo un umbral de discriminación como se muestra ejemplificado en la figura 5. Se considera que una tasa igual o menor al 1% es aceptable.

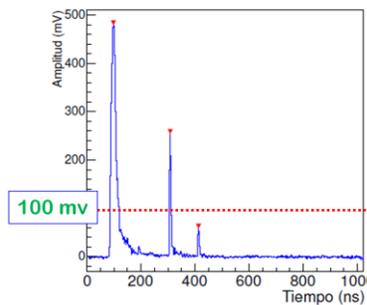


Figura 5. Pulso principal centrado en 100 ns seguido de dos pulsos tardíos, uno centrado en 240 ns y otro centrado en 400 ns. Con un umbral de discriminación de 100 mV se puede discriminar el segundo pulso tardío.

La amplitud de los pulsos tardíos dependerá del tipo de ion, pero no de la amplitud de la señal principal (Ma, K.J. et al., 2009), mientras que la tasa de pulsos tardíos si se espera que sea dependiente de la amplitud de la señal principal.

El origen de los pulsos tardíos se ha asociado a la presencia de iones como He^+ , H_2^+ , N_2^+ y CO^+ . Está reportado que en fotomultiplicadores expuestos al aire por lo menos dos años los pulsos tardíos asociados al He incrementan drásticamente comparados con aquellos causados por iones más pesados (Incandela et al., 1987; Morton, 1967).

3. PARTE EXPERIMENTAL

El diagrama del arreglo experimental se muestra en la figura 6. Se conectó un generador de señales a los LED's colocados dentro de cada hemisferio del detector. Se produjeron señales cuadradas de 10 ns de ancho a una frecuencia de 2kHz y se registraron con un módulo de digitalización FADC programado para tener una frecuencia de muestreo de 1GS/s, o lo que es



igual, una duración temporal por evento de un microsegundo. La señal para disparar la adquisición de datos en el FADC se obtuvo del mismo generador de señales.

Para la digitalización de las señales se utilizó un módulo NIM Mod. N6742 de CAEN con 16 canales de lectura. En el proceso de digitalización una memoria digital analógica de 1024 pxeles muestrea la señal a una frecuencia de programable de 5 GS/s, 2.5 GS/s o 1 GS/s. Cuando una señal de trigger llega al FADC, la información almacenada se digitaliza con una resolución de 12 bits en una memoria digital.

El alto voltaje de los fotomultiplicadores se varió de 1500 V a 2300 V en incrementos de 100 V. Se registraron 100,000 eventos por alto voltaje por celda. Los eventos registrados por el FADC se enviaron a la computadora de adquisición de datos, donde fueron almacenados en archivos .dat y fueron analizados posteriormente con rutinas en C++ y haciendo uso de ROOT que es un software para el análisis de datos desarrollado por el CERN.

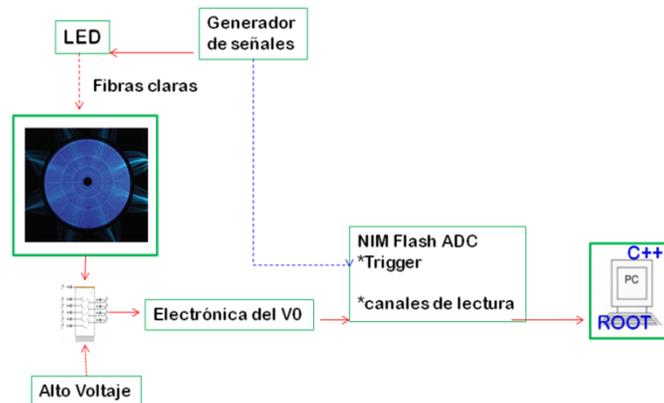


Figura 6. Arreglo experimental para la medición de pulsos tardíos.

Con los eventos registrados se estudiaron las correlaciones tiempo-amplitud de todas las señales registradas por el FADC como la mostrada en la figura 7. Asimismo se estudiaron las distribuciones temporales, y se calculó la tasa de pulsos tardíos para cada fotomultiplicador.

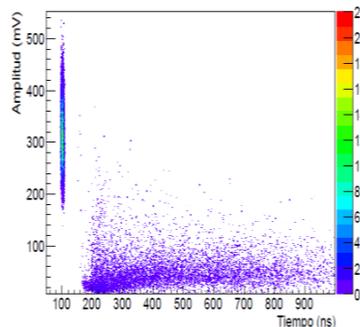


Figura 7. Correlación tiempo amplitud de las señales registradas por el FADC. Los pulsos principales están centrados en 100 ns.

La figura 8 muestra los grupos de pulsos tardíos observados en cada fotomultiplicador medido, en casi todos existen dos grupos de pulsos tardíos.

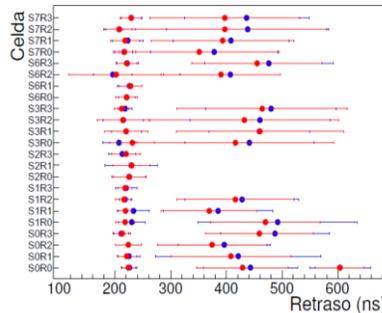


Figura 8. Tiempo de llegada de los grupos de pulsos tardíos a 2000 V (puntos azules) y 2200 V (puntos rojos).

En la figura 9 se muestra la tasa de pulsos tardíos para diferentes umbrales de discriminación. A 2100 V y con un umbral de .4 MIP's es posible reducir la tasa de pulsos tardíos al 1%.

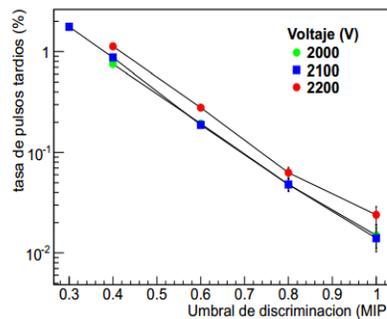


Figura 9. Tasa de pulsos tardíos en función del umbral de discriminación en MIP's.

4. CONCLUSIONES

Los pulsos tardíos se observaron en todas las señales de los fotomultiplicadores estudiados. La cantidad de pulsos tardíos depende del alto voltaje y disminuye con el tiempo.

En las distribuciones temporales fue posible distinguir dos grupos de pulsos tardíos. El primer grupo de pulsos tardíos se observó después de 100 ns de la señal principal. Este grupo tiene una distribución temporal angosta y bien definida. El retraso temporal entre la señal principal y pulsos tardíos no depende del alto voltaje.

Los pulsos tardíos pertenecientes al segundo grupo se observaron 200 ns a 400 ns después de la señal principal. Este grupo tiene una distribución temporal más ancha. En este caso el retraso temporal entre señal principal y pulsos tardíos si depende del alto voltaje. Los pulsos tardíos llegan más rápido al fotocátodo conforme el voltaje aumenta y esto es característico de los pulsos tardíos generados por ionización de gases residuales.

La amplitud de los pulsos tardíos del primer grupo es mayor a la amplitud de los del segundo grupo. La amplitud de los pulsos producidos por iones más ligeros está reportado que es siempre mayor comparada con la amplitud de los pulsos producidos por iones más pesados por lo que es posible asociar el primer grupo a iones ligeros y el segundo grupo a iones pesados.

La tasa de pulsos tardíos depende del alto voltaje, es mayor conforme el voltaje crece. La tasa de pulsos para cada celda es diferente, para algunas celdas la tasa se mantiene por debajo del 1% para voltajes de 1600 V a 2200 V, para otras la tasa pueden alcanzar hasta el 10%.



En algunos fotomultiplicadores fue posible disminuir la tasa de pulsos tardíos hasta el 1% (que es aceptable) utilizando umbrales de discriminación menores a 1 MIP (que es un requerimiento para no perder las señales de 1 MIP) por lo que fue posible reducir la tasa de pulsos tardíos al valor requerido haciendo uso de umbrales de discriminación.

Es necesario calibrar los fotomultiplicadores para encontrar un balance entre el voltaje de operación y el nivel de discriminación, para minimizar el ruido y maximizar la ganancia.

Antes de colocar los fotomultiplicadores en el detector es recomendable caracterizar los pulsos tardíos de cada uno, pues como se mostró la tasa de pulsos es diferente para cada PMT.

BIBLIOGRAFÍA

1. Akgun, U., Ayan, A. S., Aydin, G., Duru, F., Olson, J., y Onel, Y. (2008). Afterpulse timing and rate investigation of three different hamamatsu photomultiplier tubes. *Journal of Instrumentation*, 3(01), T01001.
2. Coates, P. B. (1973). The origins of afterpulses in photomultipliers. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 6(10), 1159. Disponible en: <http://stacks.iop.org/00223727/6/i=10/a=301>
3. Flyckt, S. O. y Marmonier, C. (2002). *Photomultiplier tubes: Principles and applications* (Segunda ed.). Francia: Philips Photonics.
4. Incandela, J., Ahlen, S., Beatty, J., Ciocio, A., Felcini, M. et al. (1987). The performance of photomultiplier exposed to helium. *Nucl. Instrum. Methods A*, 269 (1), 237-245.
5. Knoll, G. F. (2000). *Radiation detection and measurement* (Tercera ed.). Estados Unidos de América: John Wiley & Sons, Inc.
6. Lubsandorzhiev, B., Pokhil, P., Vasiljev, R., y Wright, A. (2000). Studies of prepulses and late pulses in the 8" electron tubes series photomultipliers. *Nucl. Instrum. Methods A*, 442 (1-3), 452-458. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900299012723>
7. Ma, K.J (2009). Time and Amplitude of Afterpulse Measured with a Large Size Photomultiplier Tube. *Nucl.Instrum.Meth.A* 629:93-100, 2011.Morton et al. (1976). Afterpulses in photomultipliers. *IEEE Trans. Nucl. Sci NS-14* (1967) 443.