

ESTUDIO DE LA SEÑAL EXPERIMENTAL DE PARTÍCULAS MASIVAS,
CARGADAS Y ESTABLES EN EL EXPERIMENTO CMS

DIEGO MAURICIO GÓMEZ CORAL

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE FÍSICA
SAN JUAN DE PASTO
2009

ESTUDIO DE LA SEÑAL EXPERIMENTAL DE PARTÍCULAS MASIVAS,
CARGADAS Y ESTABLES EN EL EXPERIMENTO CMS

DIEGO MAURICIO GÓMEZ CORAL

Trabajo de grado como requisito parcial para optar al título de Físico

Director:

Jaime Afredo Betancourt Ms.C.

Codirector:

Juan Carlos Sanabria Ph.D.

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE FÍSICA
SAN JUAN DE PASTO
2009

Nota de aceptacion:

Director

Jurado

Jurado

”Las ideas y conclusiones aportadas en la tesis de grado son responsabilidad exclusiva de los autores”

Artículo 1. del acuerdo No. 324 del 11 de Octubre de 1966, emanado por el Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

A mis pesadillas

Toda nuestra ciencia,
comparada con la realidad,
es primitiva e infantil...
y sin embargo es lo máspreciado
que tenemos.

Albert Einstein

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la colaboración y asesoría prestada en el desarrollo de mi tesis de grado como también el haberme hecho parte de este proyecto conjunto, a los profesores de la Universidad de Nariño: Jaime Betancourt, y del departamento de física de la Universidad de los Andes: Juan Carlos Sanabria, Carlos Avila y Bernardo Gómez. De igual manera quiero agradecer a Colciencias por el apoyo económico brindado a este proyecto.

Gracias también por la asesoría prestada en el desarrollo del programa al Ing. Fabio Montenegro, y por toda la información brindada sobre este tema al investigador y estudiante de postgrado Camilo Carrillo.

A todos mis amigos de paseos y copas como a los de la carrera, y por supuesto a mi familia, en especial a mi madre Gloria Coral y a mi hermana Carolina Gómez

TABLA DE CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCION	16
1. OBJETIVOS	18
1.1. OBJETIVO GENERAL	18
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2. HEAVY STABLE CHARGED PARTICLES (HSCPS)	19
3. HSCPS Y EL EXPERIMENTO CMS	22
3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL CMS	22
3.1.1. Detector de Trazas (Silicon Tracker)	22
3.1.2. Calorímetro Electromagnético (ECAL)	22
3.1.3. Calorímetro Hadrónico (HCAL)	24
3.1.4. Solenoide Superconductor	24
3.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE DETECTORES DE MUONES	25
3.2.1. Cámaras de tubos de deriva (DT)	26
3.2.2. Cámaras de cintas catódicas (CSC)	26
3.2.3. Cámaras de placas resistivas (RPC)	27
3.3. BUNCH CROSSING	28
3.4. SEÑALES DE HSCPS EN CMS	29
4. PRODUCCIÓN DE HSCPS EN CMS	31
4.1. SIMULADOR PYTHIA	31

4.2. PRODUCCIÓN DE S-TAUS	31
4.3. TÉCNICA DEL TIEMPO DE VUELO (ToF)	32
5. RESULTADOS	37
5.1. PRODUCCIÓN DE S-TAUS	37
5.2. IDENTIFICACIÓN DE HSCPS	39
5.2.1. Resultados Preliminares	39
5.2.2. Selección de β y p_T	47
6. CONCLUSIONES	52
BIBLIOGRAFIA	53
ANEXOS	55

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 2.1. Sumario de partículas estables y masivas	20
Tabla 3.1. Características del solenoide superconductor	26
Tabla 4.1. Subprocesos supersimétricos implementados en la simulación	32

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 3.1. Detector CMS y su sistema de coordenadas	23
Figura 3.2. Cuadrante de CMS en el plano $x-y$.	25
Figura 3.3. Distribución del sistema de detectores de muones	27
Figura 3.4. Características bunches LHC	28
Figura 3.5. Distribuciones de p_T y β para muones y s-leptones	29
Figura 4.1. Esquema de las capas de RPCs en CMS	33
Figura 4.2. Geometría aproximada de las capas de RPCs	35
Figura 4.3. Simulación del movimiento de un muón a través del detector CMS	36
Figura 4.4. Trayectoria en tres dimensiones de un muón en CMS	36
Figura 5.1. Distribuciones normalizadas de β para muones y s-taus.	37
Figura 5.2. Estudio de eficiencia como función de β , en la asignación correcta de bx	38
Figura 5.3. Distribuciones de p_T para muones y s-taus.	39
Figura 5.4. Distribuciones de pseudorapidez para muones y s-taus.	40
Figura 5.5. Distribuciones de bunch crossing para muones en la zona del barril	41
Figura 5.6. Distribuciones de bunch crossing para muones en las zonas laterales	42
Figura 5.7. Distribuciones de bunch crossing para $\tilde{\tau} = 100 \text{ GeV}$ en la zona del barril	43
Figura 5.8. Distribuciones de bunch crossing para $\tilde{\tau} = 100 \text{ GeV}$ en las zonas laterales	44
Figura 5.9. Distribuciones de bunch crossing para $\tilde{\tau} = 500 \text{ GeV}$ en la zona del barril	45
Figura 5.10. Distribuciones de bunch crossing para $\tilde{\tau} = 500 \text{ GeV}$ en las zonas laterales	46
Figura 5.11. Distribuciones de bx para $\tilde{\tau} = 100 \text{ GeV}$ en la zona del barril con $\beta < 0,7$	48
Figura 5.12. Distribuciones de bx para $\tilde{\tau} = 100 \text{ GeV}$ en las zonas laterales con $\beta < 0,7$	49
Figura 5.13. Distribuciones de bx para $\tilde{\tau} = 500 \text{ GeV}$ en la zona del barril con $\beta < 0,7$	50
Figura 5.14. Distribuciones de bx para $\tilde{\tau} = 500 \text{ GeV}$ en las zonas laterales con $\beta < 0,7$	51

LISTA DE ANEXOS

	Pág
Anexo A. Programa para la producción de s-taus ($\tilde{\tau}$)	55
Anexo B. Movimiento de una partícula cargada en un campo magnético.	58
Anexo C. Programa para la propagación de HSCPs.	61

GLOSARIO

ATLAS: detector de propósito general que hace parte del LHC, y se constituye en el experimento más grande de los cinco que componen al gran colisionador de hadrones.

BUNCH CROSSING: es la colisión de dos paquetes de protones que se lleva a cabo cada cierto intervalo de tiempo.

CMS: es uno de los detectores de propósito general que hacen parte del LHC, que es capaz de estudiar múltiples aspectos de las colisiones de protones, como la medición de energías y cantidades de movimiento de las partículas producidas en dichas colisiones.

CSC: las cámaras de cintas catódicas, son una de las clases de detectores de muones usados en CMS.

DT: los tubos de deriva son sub-detectores que hacen parte de los detectores de muones ubicados en CMS.

ECAL: el calorímetro electromagnético es uno de los sub-detectores de partículas que hacen parte de CMS y su función es medir la energía de partículas como electrones y fotones.

GMSB: modelo de rompimiento de la supersimetría.

HCAL: el calorímetro hadrónico es uno de los sub-detectores de partículas que hacen parte de CMS y su función es medir la energía de hadrones y energía faltante de partículas neutras.

HSCPS: son partículas masivas, cargadas y cuasi-estables, predichas por muchos modelos teóricos.

LHC: el gran colisionador de hadrones es un acelerador de partículas, ubicado en la organización europea para la investigación nuclear cerca de Ginebra en la frontera Franco-Suiza. Se diseñó para colisionar haces de protones de 7 TeV de energía, siendo su propósito principal examinar la validez y límites del modelo estándar.

LSP: partícula supersimétrica más ligera.

MODELO ESTANDAR: es una teoría que describe las relaciones entre las interacciones fundamentales conocidas entre partículas elementales que componen toda la materia.

MSSM: es el modelo de la mínima extensión de la supersimetría al modelo estándar.

MUON: partícula elemental masiva que pertenece a la segunda generación de leptones, posee carga eléctrica negativa y tiene un tiempo de vida largo.

NLSP: siguiente partícula supersimétrica más ligera.

PYTHIA: es un programa computacional que permite simular una gran variedad de procesos físicos e interacción entre partículas, como las colisiones entre protones.

ROOT: es una herramienta computacional con el cual se logra realizar analisis de datos y obtener histogramas.

RPC: cámaras de placas resistivas, son una de las clases de detectores de muones usados en CMS, que funciona bajo principios de ionización.

S-TAUS: partícula predicha por la supersimetría en modelos como MSSM y GMSB para ser una candidata a HSCP.

STOPPING POWER: es una técnica de detección de partículas que consiste en medir la energía depositada por éstas al atravesar el detector.

SUSY: supersimetría es una teoría que plantea una simetría hipotética, que relaciona las propiedades de bosones y fermiones.

TOF: se denomina la técnica del tiempo de vuelo que consiste en medir el tiempo que le toma a una partícula viajar una distancia conocida para detectar partículas pesadas.

RESUMEN

Existe una gran expectativa en cuanto al descubrimiento de física más allá del modelo estándar, en las colisiones protón-protón a energías de 14TeV que se llevarán a cabo en el gran colisionador de hadrones: LHC. Varios modelos teóricos como Supersimetría y modelos con dimensiones espaciales extra predicen la existencia de partículas masivas, cargadas eléctricamente y de larga vida, denominadas genéricamente HSCPs (Heavy Stable Charged Particles). En el experimento CMS, las cámaras de muones pueden detectar cualquier partícula cargada que las atraviese, incluyendo hipotéticas HSCPs. Estas partículas tendrían una velocidad menor comparada con la velocidad de la luz y por lo tanto tardarán más tiempo en llegar a cada uno de los detectores de lo que les toma a las demás partículas. Este proceso de medición de los retrasos en los tiempos de vuelo es una de las técnicas que será utilizada en la identificación de HSCPs. En este trabajo se presenta un modelo computacional que reconstruye las trayectorias y los tiempos de las HSCPs cuando se propagan a través de la configuración de campos magnéticos del experimento CMS; la simulación de la señal experimental se realiza usando el generador de eventos Pythia.

ABSTRACT

There are great expectations about new physics beyond Standard Model, in proton-proton collisions at energies of 14TeV which will take place in Large Hadron Collider: LHC. Several theoretical models like Supersymmetry, and extra dimensions models predict the existence of heavy, long lived, charged particles called HSCPs (Heavy Stable Charged Particles). In CMS experiment, the muons chambers can detect any charged particle that passes through, even hypothetical HSCPs. These particles would have a speed less than speed of light and accordingly would take more time to arrive each one of the detectors than other kinds of particles. This process of measuring time of flight delays is one of the techniques that will be used in HSCPs identification. In this article we present a computational model which reconstructs the HSCP's trajectories and times when they pass through CMS magnetic fields configuration; the experimental signal simulation was done using the events generator Pythia.

INTRODUCCION

Nos encontramos en una época muy importante en la extensa y emocionante historia de la física; el experimento de altas energías mas grande del mundo (Large Hadron Collider) se prepara para comenzar su búsqueda de respuestas a las preguntas más profundas del universo. Las expectativas en la comprobación experimental de un gran número de modelos y predicciones teóricos es alta; encontrar partículas nuevas con características diferentes o similares a las ya existentes es el objetivo principal. En este escenario se abre la posibilidad de la existencia de partículas con propiedades especiales como el que sean cargadas, estables y pesadas (HSCPs), es decir que tengan una masa por encima de los 100GeV , lo que resulta muy conveniente a la hora de observarlas experimentalmente.

De los inmensos detectores que hacen parte del LHC, este estudio se basará en CMS (Compact Muon Solenoid), que a pesar de no haber sido diseñado para esta búsqueda en particular, las características de sus sistemas de detección pueden ser utilizadas. Esto es posible porque en primer lugar se espera que las HSCPs sean cuasi-estables, esto significa que el tiempo que les toma en decaer a partículas completamente estables es mucho mayor que el que les toma atravesar detectores como CMS. En segundo lugar se espera que las HSCPs tengan carga eléctrica (carga de color en ciertos casos) de manera que pueden interactuar con la materia y en especial con las cámaras de muones. Estos sistemas de detección funcionan bajo principios de ionización, encaminados a identificar el paso de partículas cargadas. Por último está la propiedad que resulta más importante para el desarrollo de este trabajo: la alta masa de las HSCPs, que trae como consecuencia inmediata una baja velocidad de propagación comparada con la velocidad de la luz, y con respecto a las demás partículas cargadas producidas en las colisiones.

Lo anterior conlleva a que mientras partículas como los muones viajan a velocidades muy cercanas a la velocidad de la luz, (desde el punto de interacción en el experimento, hasta los sistemas de detección de muones) las HSCPs serán lentas y presentarán un retraso en el tiempo con respecto a los muones. Mediante la medida y comparación de estos retrasos, se puede lograr determinar si se trata o no de una HSCP; es decir que la velocidad se convierte en una regla de selección en la búsqueda de HSCPs. Ésta técnica es conocida como tiempo de vuelo (Time of Flight) y es la base de este trabajo. Pero también hay otra técnica que complementa la anterior y que será utilizada en los experimentos, se trata de la pérdida de energía ó stopping power, y se basa en la medida de la deposición de energía por parte de las HSCPs mediante procesos de ionización.

Pero para analizar y comparar los retrasos de los tiempos de las HSCPs con respecto a los muones, se debe tener en cuenta aspectos importantes del acelerador y del sistema de muones, en especial las cámaras RPCs. En el LHC se presentarán colisiones de protones (bunch crossing) cada 25 nanosegundos, y los *sub-detectores* RPCs recibirán los datos en aproximadamente este rango de tiempo. Sin embargo, las cámaras de RPCs esperan muones con altas velocidades, por esta razón comienzan su conteo un cierto tiempo después de producida la colisión; tiempo en el cual se espera que los muones viajando a la velocidad

de la luz arriben. El sistema según esta sincronización, asignará a las partículas el bunch crossing en el que fueron detectadas, que puede o no coincidir con el bunch crossing del cual provienen.

Si las partículas se tardan en llegar a las RPCs más allá del lapso establecido, como lo harían las HSCPs, se las etiquetará con un bunch crossing equivocado y superior al que realmente pertenecen, lo que permitirá distinguirlas de las demás partículas.

Teniendo en cuenta todas las consideraciones anteriores, es posible describir el trabajo realizado y los resultados obtenidos. Se simularon las señales de partículas masivas, cargadas y estables, y se construyó un programa en computadora con el objetivo de medir sus tiempos de vuelo entre el punto de interacción y las capas donde se encuentran los *sub-detectores* RPCs. Se incluyó dentro del programa la desviación de sus trayectorias causada por los intensos campos magnéticos encontrados en CMS y las respectivas asignaciones de bunch crossing. Al final se obtuvieron distribuciones de dichas asignaciones, donde se observa que existe una diferencia entre HSCPs y muones, sobre todo para ciertos valores de velocidad y momentum.

En el segundo capítulo se inicia dando una recopilación de los modelos teóricos sobre partículas estables y masivas más destacados, como también una breve explicación de sus predicciones y comportamientos. Se plantea además los dos métodos experimentales utilizados en la identificación de HSCPs. En el tercer capítulo se describe de una manera breve el acelerador LHC y de una forma más profunda el detector CMS, señalando cada una de sus partes y el funcionamiento correspondiente; sobre todo lo relacionado con los detectores de muones y las cámaras de RPCs. Al final de este capítulo se definen conceptos importantes para el desarrollo del trabajo, como son bunch crossing y la técnica del tiempo de vuelo, así como ciertas pautas sobre la forma de las señales de HSCPs en el detector CMS. Ya en el cuarto capítulo se inicia la producción de partículas masivas cargadas y estables, tales como los s-taus a través del generador de eventos pythia, seleccionando procesos determinados y un modelo teórico conveniente. A partir de este proceso se obtienen distribuciones de sus variables dinámicas como velocidad y momento transversal. Por último se estudia la construcción del programa que propagará HSCPs en los campos magnéticos del CMS, advirtiendo las consideraciones físicas detrás de este movimiento. En el quinto capítulo se indican los resultados y análisis tanto de las señales de HSCPs como del tiempo de vuelo, este último mediante las distribuciones de bunch crossing. En el sexto capítulo están sintetizadas las conclusiones y en el séptimo se presentan los anexos, dentro de los que se encuentran los códigos de los programas utilizados y otros documentos que se creen convenientes.

1 OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar en detalle la señal experimental simulada de la producción de partículas supersimétricas masivas, cargadas y estables (HSCPs) en el LHC y su detección por parte del experimento CMS usando los detectores resistive plate chambers (RPCs) y la técnica del tiempo de vuelo (ToF)

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Generar partículas HSCPs usando el simulador PYTHIA por ejemplo s - τ aus.

Estudiar las características cinemáticas de las partículas producidas.

Implementar un modelo computacional de la configuración de campos magnéticos del CMS para propagar las partículas producidas.

Estudiar el tiempo de vuelo de las HSCPs hasta las diferentes capas de RPCs del CMS.

Determinar la forma de las señal producida por las RPCs, teniendo en cuenta la estructura en tiempo de las colisiones en el LHC.

2 HEAVY STABLE CHARGED PARTICLES (HSCPS)

Modelos teóricos más allá de modelo estandar (ME) predicen la existencia de partículas masivas, cargadas y quasi-estables. Entre estos modelos se encuentran la supersimetría, las dimensiones extra, paridad de Kalutza-Klein, etc.

La supersimetría (SUSY) es una simetría extendida entre fermiones y bosones, que predice la existencia de un compañero supersimétrico por cada partícula del modelo estandar. Sin embargo debido a la ausencia de evidencia experimental sobre partículas supersimétricas hasta el momento, se afirma que debe existir una diferencia de masas entre partículas del ME y sus susy-compañeras, implicando esto que SUSY debe ser una simetría rota a una escala de baja energía¹. Se espera que la diferencia de masas se encuentre en el nuevo rango de energías alcanzado por el LHC, y así poder observar partículas supersimétricas.

En los modelos SUSY más generales se presenta una inconsistencia con el tiempo de decaimiento del protón, el cual se soluciona tomando la conservación de la R-paridad, número cuántico que se define como: $R = (-1)^{3B+L+2S}$, donde B y L se refieren a los números bariónicos y leptónicos de la partícula respectivamente, y S es el espín. A las partículas del ME les corresponde $R = 1$, mientras que a las supersimétricas $R = -1$. La conservación de la R-paridad conlleva a que las s-partículas (la s se refiere a supersimétricas) deban producirse en pares en las colisiones protón-protón, las s-partículas decaen en una partícula del ME y otra s-partícula. Como consecuencia de esto, la partícula supersimétrica más ligera (LSP) debe ser estable, y aunque puede ser cargada, argumentos cosmológicos indican que debería ser neutra y susceptible a la interacción débil, constituyendose en un candidato para materia oscura². Si la siguiente partícula más ligera (NLSP) posee carga eléctrica y un tiempo de vida largo, entonces será una candidata a HSCP³.

La mínima extensión de la supersimetría al modelo estandar: el modelo mínimo supersimétrico (MSSM), conserva la R-paridad y presenta a varios candidatos como partículas masivas y estables, dependiendo de los parámetros libres de la teoría. Por ejemplo se presenta al neutralino ($\tilde{\chi}_1^0$) como LSP (lo cual como ya mencionamos es conveniente ya que el neutralino cumple las características para ser un candidato de materia oscura) y al s-top (\tilde{t}_1 , compañero supersimétrico del quark top) como una partícula con un tiempo de vida largo; incluso en las condiciones adecuadas se obtiene al gluino (\tilde{g} , compañero supersimétrico del gluón) como NLSP. Sin embargo hay opciones más atractivas para NLSP con carga eléctrica como el chargino $\tilde{\chi}_1^+$ y el s-tau ($\tilde{\tau}_1$) que es con el que vamos a trabajar en las simulaciones. El $\tilde{\tau}_1$ y los demás s-leptones también son considerados en el modelo de rompimiento de simetría

¹FAIRBAIRN, M. et al. Stable Massive Particles at Colliders. En: Physics Reports. arXiv:hep-ph/0611040v2 (dic. 2006); p. 1-100.

²CARDONA, Simon. Estudio de señales SUSY en canales de dimuones utilizando el simulador pythia. Santafé de Bogotá, 2007, 70p. Trabajo de grado (Físico): Universidad de los Andes. Departamento de Física.

³CARRILLO, Camilo. Search for Heavy Stable Charged Particles in the CMS Experiment using the RPC detectors. Santafé de Bogotá, 2008, 36p. Propuesta tesis (Doctor of Philosophy): Universidad de los Andes. Departamento de Física.

GMSB (Gauge Mediated Supersymmetry Breaking) así como el neutralino $\tilde{\chi}_1^0$; pero tomando al gravitino (\tilde{G}) como LSP ($\leq 1KeV$)^{4, 5}. Ver cuadro 2.1.

Tabla 2.1: Sumario de algunas clases de partículas estables y masivas predichas por modelos con parametrizaciones convenientes.

Partícula Estable y Masiva	LSP	Modelo
s-tau ($\tilde{\tau}_1$)	neutralino ($\tilde{\chi}_1^0$)	MSSM
chargino ($\tilde{\chi}_1^+$)	neutralino ($\tilde{\chi}_1^0$)	MSSM
s-top (\tilde{t}_1)	neutralino ($\tilde{\chi}_1^0$)	MSSM
gluino (\tilde{g})	neutralino ($\tilde{\chi}_1^0$)	MSSM
s-tau ($\tilde{\tau}_1$)	gravitino (\tilde{G})	GMSB
neutralino ($\tilde{\chi}_1^0$)	gravitino (\tilde{G})	GMSB

FAIRBAIRN, Op.cit.,p.6.

La posibilidad de tener partículas de larga vida como el gluino, es tratada con mayor detalle por otro modelo perteneciente a la familia de la supersimetría que se denomina Split SUSY. Según este modelo gluinos y s-quarks forman un singlete de color llamado R-Hadron en analogía con los hadrones de la teoría QCD. Esto sucedería porque todos los s-bosones están a una escala de masa muy alta y solo los s-fermiones están a la escala de TeV accesibles a experimentos como ATLAS y CMS. Uno de aquellos s-fermiones es el gluino que al tener carga de color puede decaer solamente en otras partículas con carga de color; sin embargo la R-paridad prohíbe un decaimiento directo a quarks y gluones del modelo estandar, y como mencionamos los s-quarks tendrían una masa mucho mayor. Estos R-Hadrones pueden ser R-Mesones, R-Bariones o R-Glueballs, de acuerdo a su contenido supersimétrico. Uno de los aspectos más interesantes de los R-Hadrones es que cambian su carga eléctrica cuando hay interacciones nucleares con la materia que atraviesan, debido a que pueden cambiar su estructura interna. Otro escenario para el rompimiento de la supersimetría, es el AMSB (Anomaly Mediated SUSY-Breaking), que es una variante del modelo GMSB donde el chargino más ligero ($\tilde{\chi}_1^+$) es considerado como NLSP y el neutralino ($\tilde{\chi}_1^0$) llegaría a ser LSP ⁶.

A parte de la supersimetría y todas sus variantes se encuentran modelos de dimensiones extra (Universal Extra Dimension), que proponen la existencia de dimensiones adicionales a las tres espaciales y una temporal observadas comunmente; y que pretenden unificar fuerzas fundamentales como la gravedad y el electromagnetismo. En modelos UED todos los campos del ME pueden propagarse en algún número de dimensiones extra compactas y construidas de tal manera que el momentum siga conservandose. En el caso de cuatro dimensiones surge un número cuántico importante: Kalutza-Klein (KK), y los KK estados más ligeros se espera que sean estables, neutros, y por lo tanto candidatos a materia oscura. Por su parte los KK estados de las partículas del ME más ligeras tendrán tiempos de vida largos convirtiendose en candidatos a HSCPs; lo que significa que KK-leptones pueden ser detectados por el sistema

⁴FAIRBAIRN, Op.cit.,p.8.

⁵NUNNEMANN, T. et al. A Search for Charged Massive Stable Particles. En:Proceedings of Science. arXiv:hep-ex/0602039v1 (feb. 2006); p. 1-4.

⁶FAIRBAIRN, Op.cit.,p.11.

de muones del CMS ⁷.

En general diferentes modelos tienen diferentes características; sin embargo las HSCPs tienen una característica común, y es que si son producidas viajarán con una velocidad significativamente menor que la velocidad de la luz. Esta afirmación hace su búsqueda independiente del modelo teórico ⁸.

Existen dos métodos experimentales para la identificación de HSCPs, la pérdida de energía ($\frac{dE}{dx}$), que determina la velocidad de estas partículas a través de la energía depositada en los calorímetros, y el tiempo de vuelo (*ToF*) ⁹, técnica adaptada de la física nuclear que consiste en medir el tiempo que les toma a las partículas alcanzar cierto detector sobre una distancia conocida, y a partir de aquí determinar cuáles son más masivas que otras. En el caso del experimento CMS, los detectores encargados de recibir la señal de aquellas partículas serán los detectores de muones, tales como las RPCs y los DTs.

⁷CARRILLO, Op.cit.,p.8.

⁸GIAGU, S. Search for long-lived particles in ATLAS and CMS. En: Cern Document Server. ATL-PHYS-PROC-2008-029 (Oct. 2008); p. 1-4.

⁹BRESSLER, S. R-Hadron and long lived particles searches at the LHC. arXiv:0710.2111v3 [hep-ex] (Oct. 2007); p. 1-4.

3 HSCPS Y EL EXPERIMENTO CMS

El LHC (Large Hadron Collider), es en la actualidad el acelerador de partículas más grande del mundo. Ubicado en Europa en la frontera Franco-Suiza, con una circunferencia de 27 Km, el LHC es capaz de producir colisiones protón contra protón a una energía de centro de masa de 14 TeV. El LHC está constituido por dos detectores de propósito general: CMS y ATLAS, y dos detectores de propósito específico: ALICE y LHCb.

3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL CMS

Compact Muon Solenoid (figura 3.1) ha sido diseñado y construido con simetría cilíndrica alrededor del tubo del acelerador. Esta constituido por una serie de *sub-detectores* cada uno con un conjunto de propiedades que le permiten estudiar cada evento físico producido. Con el ánimo de lograr una alta resolución en el momentum sin exigir alineamiento y resolución a las cámaras de muones, CMS posee un solenoide superconductor que produce un campo magnético 100,000 veces más grande que el de la tierra. Al ser un detector de propósito general, será usado para la mayoría de los descubrimientos en potencia como el boson de Higgs, física más allá del modelo estándar (SUSY), etc. Cabe resaltar que el experimento no fue construido para la búsqueda explícita de HSCPs, pero aun así puede ser usado. Los *sub-detectores* están ubicados en capas cilíndricas en un orden lógico y son descritos a continuación:

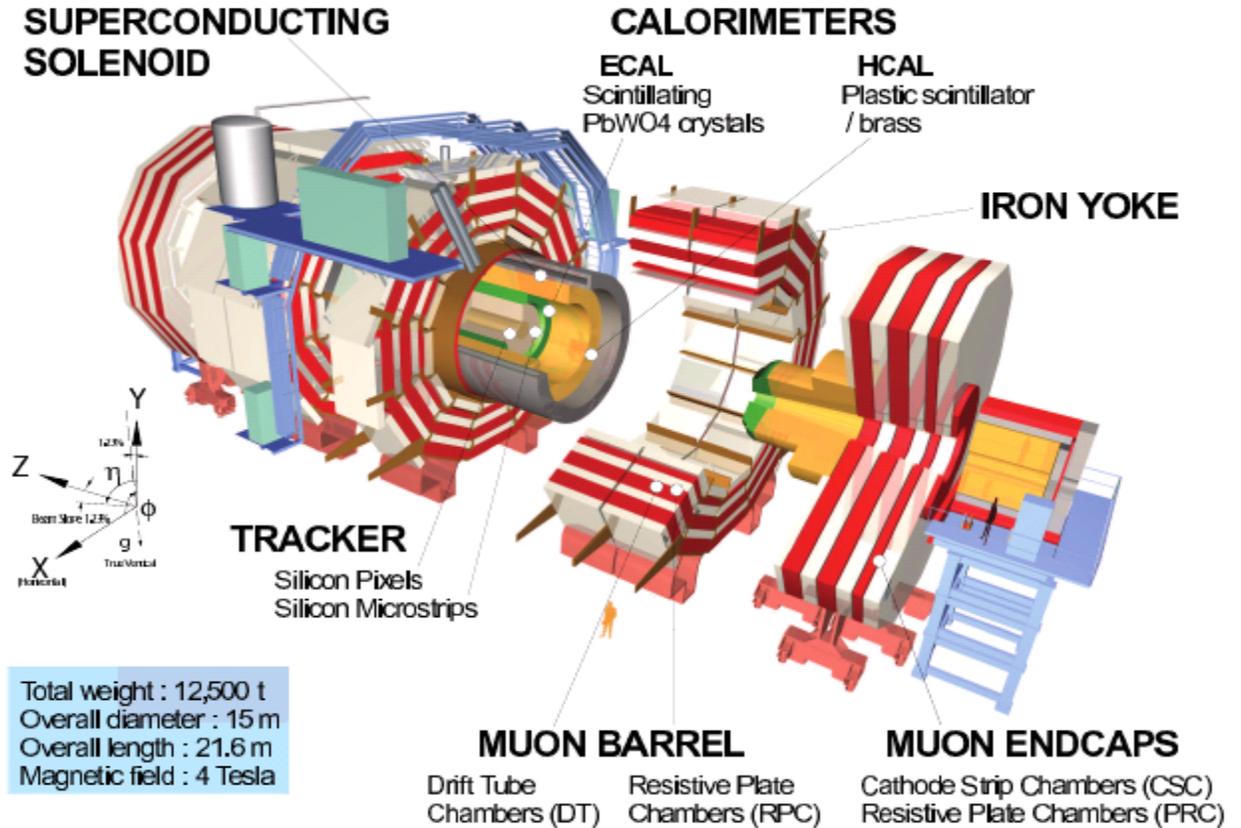
3.1.1. Detector de Trazas (Silicon Tracker) Es el primer *sub-detector*, y es el encargado de medir las trayectorias y los momentos de partículas cargadas por encima de $\eta \simeq 2,4$. Consiste en su totalidad de detectores de sílice. Primero está el sistema de pixeles con tres capas en la parte central ó parte del barril a 4,4 cm, 7,3 cm y 10,2 cm, y con una longitud de 54 cm. Además hay dos discos de 6 a 15 cm de radio en las partes laterales del detector. Al estar tan cerca del punto de colisión la cantidad de partículas que atraviesan el sistema de pixeles es de aproximadamente 10 millones por centímetro cuadrado por segundo. El detector de trazas es capaz de reconstruir las trayectorias de cada partícula al contener cerca de 65 millones de pixeles.

Después del sistema de pixeles donde el flujo de partículas ha disminuido, se encuentran las cintas de sílice (Silicon Strip Tracker) que alcanzan un radio dentro del detector de 130 cm. Los detectores SST están distribuidos en cuatro capas internas en la zona del barril (TIB) y dos capas en las zonas laterales (TID), estos poseen una rápida respuesta y una buena resolución espacial. Se espera que las HSCPs dejen sus trazas por ser partículas cargadas, sin embargo estas no se tendrán en cuenta para su análisis¹.

3.1.2. Calorímetro Electromagnético (ECAL) El calorímetro electromagnético es un detector de centelleo homogéneo y hermético, que ha sido diseñado para la medición de energía

¹WHINGAM, Matthew. Commissioning of the CMS tracker and preparing for early physics at the LHC, Londres, 2008, 168p. Tesis (Doctor of Philosophy): Imperial College London. Department of Physics.

Figura 3.1: Detector CMS y su sistema de coordenadas. La pseudorapidez es una coordenada espacial, que describe el ángulo de una partícula relativo al eje de colisión y se extiende por todo el dominio de los números reales. El valor de $\eta = 0$ corresponde a una dirección perpendicular al eje de colisión, mientras que un valor de η que tiende a ∞ corresponde a una dirección paralela.



de electrones y fotones con una alta precisión. ECAL consiste de casi 76000 cristales de tungstenato de plomo ($PbWO_4$) divididos en dos secciones principales, la zona central ó zona del barril y las zonas laterales. Cuando los electrones y fotones atraviesen estos cristales se producirá luz en proporción a la energía de cada partícula; estos cristales de alta densidad producirán luz en una forma rápida (80% de la luz es emitida dentro de 25ns) y con una longitud de radiación corta ($X_0 \approx 0,89 \text{ cm}$).

La zona del barril (EB) contiene 61200 cristales con un radio interno de 129 cm cubriendo una pseudo-rapidez de $0 < |\eta| < 1,48$. Los cristales tienen una cara frontal de $\approx 22 \times 22 \text{ mm}^2$ y una longitud de 230 mm. Las capas laterales (EE) están a una distancia de 314 cm con 14648 cristales alrededor de una pseudo-rapidez $1,48 < |\eta| < 3,0$. En esta parte las dimensiones de los cristales son 220 mm de largo con una cara frontal de $\approx 28,6 \times 28,6 \text{ mm}^2$. Finalmente se encuentra una región adicional situada en frente de cada capa lateral, cubriendo una pseudo-rapidez $1,48 < |\eta| < 2,6$ con el objetivo de detectar fotones energéticos

provenientes del decaimiento de piones neutros (π_0), y distinguirlos de posibles estados finales de un Higgs ².

Junto a cada cristal se encuentra un fotodetector que ha sido especialmente diseñado para trabajar dentro del intenso campo magnético, y que detectará la luz producida por los cristales y la transformará en una señal eléctrica que será amplificada y analizada posteriormente.

3.1.3. Calorímetro Hadrónico (HCAL) El calorímetro hadrónico mide la energía de los hadrones como también energía faltante de partículas sin carga como los neutrinos. Muchas partículas no dejan rastro de su paso por el detector ya que no interactúan con la materia; HCAL debe ser hermético con el fin de que al emerger de la colisión cada una de estas partículas lo atraviese, y al hacer un balance de energía y momentum se pueda determinar con seguridad si una partícula nueva fue producida.

El calorímetro hadrónico esta constituido por materiales plásticos de centelleo y láminas de cobre y bronce muy densas. Cuando un hadrón golpea una de estas láminas ocurre una interacción en la cual se producen cascadas de partículas secundarias que chocan nuevamente con las láminas de cobre, en un efecto de avalancha. Los materiales de centelleo emiten luz azul-violeta al paso de las partículas resultantes de las cascadas, la cual es recolectada por fibras ópticas especiales de un diametro menor a 1 mm; más tarde la luz es convertida a una señal eléctrica por medio de fotodetectores ³.

La distribución del HCAL es muy parecida a la del ECAL; está por ejemplo la zona central ó zona del barril (HB) que cubre una región $-1,4 < |\eta| < 1,4$, donde se ubican 15 láminas de cobre cada una con un ancho de 5cm. En las capas laterales (HE) se cubre una región de $1,3 < |\eta| < 3,0$, además el HCAL se extiende fuera del solenoide (HO) en un conjunto de capas que cubren una región de $-1,26 < |\eta| < 1,26$ y que están divididas en anillos cada uno con capas de materiales de centelleo y láminas de hierro ⁴.

3.1.4. Solenoide Superconductor Debido a las características de los muones como partículas estables, muchos de los procesos de decaimiento que se llevarán a cabo en el experimento, los tendrán como productos finales. Para lograr su identificación CMS cuenta con un gran solenoide superconductor cuyas características se pueden observar en el cuadro (3.1).

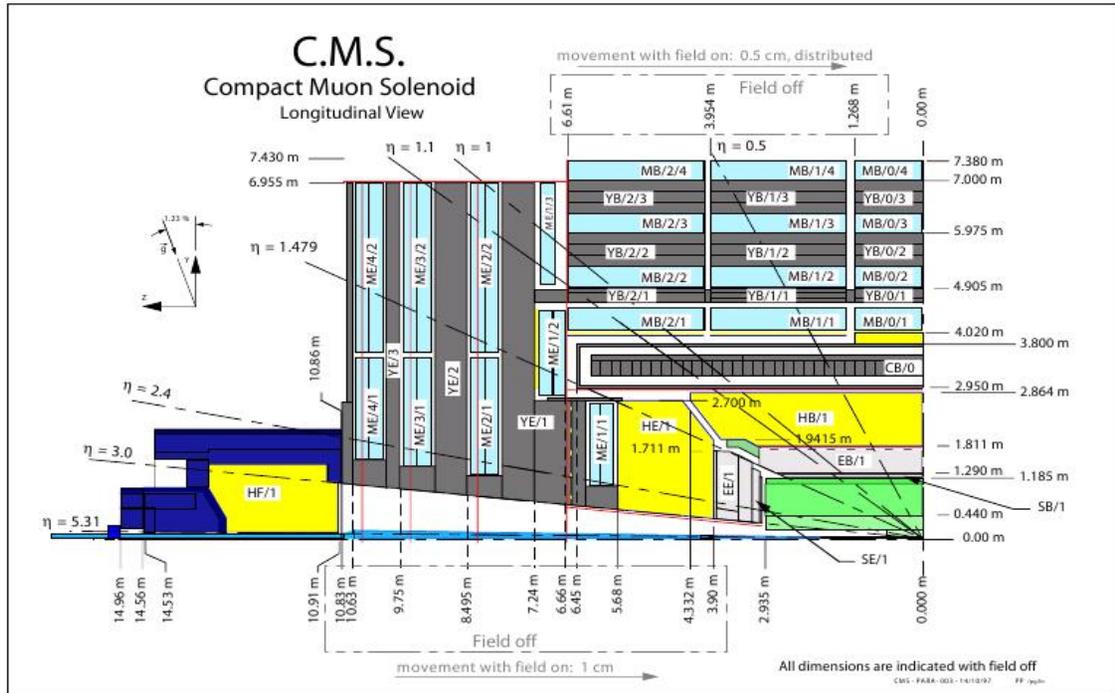
Su trabajo es curvar las trayectorias de las partículas cargadas emergentes de las colisiones; entre mayor sea el momentum de una partícula, menor será su curvatura y de esta manera trazando el recorrido se puede conocer su momentum. La intensidad del campo magnético en el interior del solenoide es de 4 Teslas; debido a la ubicación de capas de hierro en la parte exterior al solenoide junto a las cámaras de muones, el campo magnético retorna en dirección contraria a la del interior del solenoide con una intensidad de 2 Teslas. Las HSCPs

²WHINGAM, Op.cit.,p.40.

³European Organization for Nuclear Research. The Compact Muon Solenoid Experiment. <http://cms.web.cern.ch/cms/Detector/index.html>. Citado en Julio de 2009.

⁴CMS Collaboration. CMS Physics Technical Design Report: Detector Performance and Software. D. Acosta, 2006. v1, p. 92-140. ISBN 92-9083-268-1.

Figura 3.2: Cuadrante de CMS en el plano x - y . El detector de trazas está en color verde, el calorímetro electromagnético en gris claro, el calorímetro hadrónico en amarillo y las cámaras de muones en azul. Las capas de hierro (YB, YE) y el magneto (CB) están en color gris oscuro.



se verán un poco afectadas por los campos magnéticos, por lo que se considera necesario tenerlos en cuenta en la reconstrucción de las trayectorias y los tiempos de vuelo.

La última parte del detector son las cámaras de muones que serán explicadas en detalle en la siguiente sección.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE DETECTORES DE MUONES

El sistema de detección de muones está ubicado al final del experimento, esto se debe a que los muones pueden penetrar el calorímetro electromagnético, el calorímetro hadrónico, y varios metros de hierro sin interactuar con la materia que los compone. El objetivo de los *sub-detectores* es medir el momentum de los muones a través de sus trayectorias curvas por efecto del campo magnético. El sistema de muones consiste de tres dispositivos de detección distribuidos en la zona del barril y en las capas laterales, en cámaras ó estaciones alternadas por capas de hierro que retornan el campo magnético producido en los límites del solenoide.

La elección de la ubicación de los detectores de muones se ha realizado teniendo en cuenta las características de la radiación y su distribución espacial. En la región del barril ($|\eta| < 1,2$) donde el background inducido por los neutrones es pequeño, la cantidad de muones es baja, y el campo magnético residual es menor, se utiliza los tubos de deriva (Drift Tubes). En

Tabla 3.1: Características del solenoide superconductor.

Campo magnético	4 Teslas
Radio interior	5.9 m
Longitud	12.9 m
Número de vueltas	2168
Corriente	19.5 kA
Energía almacenada	2.7 GJ

CMS Collaboration, Op.cit.,p.92-140.

las capas laterales, donde la producción de muones así como el background inducido es alto, y el campo magnético también lo es, se ubican cámaras de cintas catódicas (Cathode Strip Chambers); estas cubren una región de $|\eta| < 2,4$. Las cámaras de láminas resistivas (Resistive Plate Chambers) por su parte están ubicadas en ambas regiones, la del barril y las capas laterales ⁵.

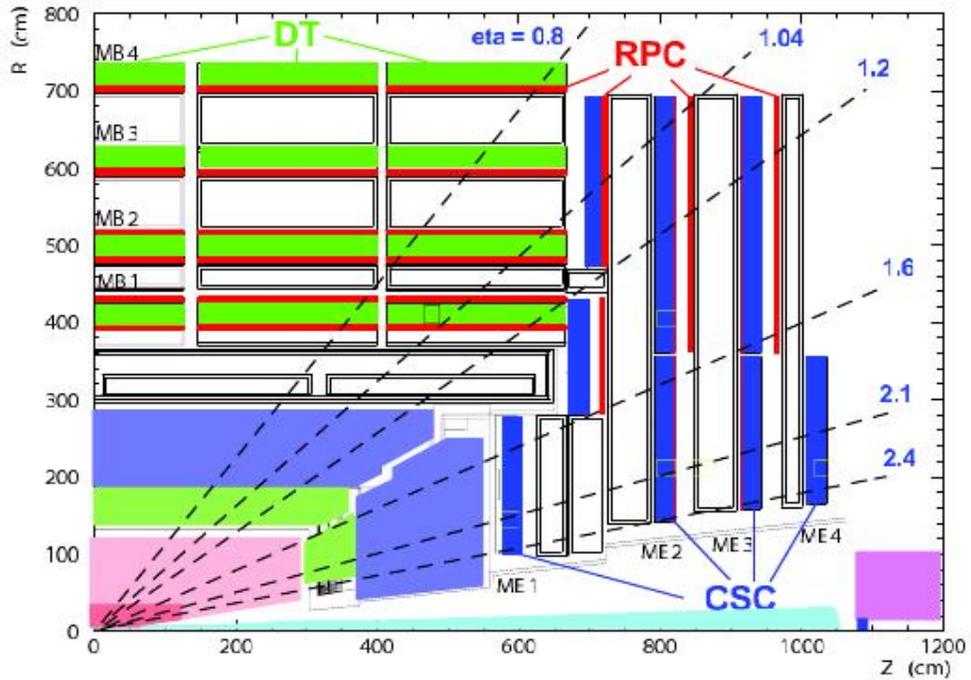
3.2.1. Cámaras de tubos de deriva (DT) Hay 250 cámaras organizadas en 4 estaciones denominadas MB1, MB2, MB3 y MB4 (figuras 3.2, 3.3); alternadas con las capas de hierro a radios aproximados de 4,0, 4,9, 5,9, y 7,0 *m* del punto de interacción. En cada una de las tres capas internas hay 12 cámaras, y en la última capa se organizan dos cámaras en su parte superior e inferior. La longitud máxima de cada tubo es 2,0 *cm* y la resolución es $\approx 200 \mu m$. Cada tubo contiene un volumen de gas junto con un alambre, cuando una partícula cargada atraviesa el gas desprende electrones de los átomos del gas y estos se dirigen al alambre cargado positivamente enviando una señal eléctrica. Los DT determinan la posición del muon mediante dos coordenadas, con una precisión mejor de 100 μm y aproximadamente 1 *mrad* en dirección.

Cada cámara DT tiene una o dos RPCs acopladas a esta antes de su instalación, dependiendo de la estación. En las estaciones MB1 y MB2 cada paquete consiste de 1 cámara DT ubicada entre 2 cámaras RPC formando un *sandwich*. En las estaciones MB3 y MB4, cada paquete contiene 1 cámara DT y 1 cámara RPC. De esta manera para a un muon con alto p_T le será posible cruzar hasta 6 cámaras de RPCs y 4 DT, produciendo cerca de 44 puntos de medida con los cuales se puede reconstruir su trayectoria.

3.2.2. Cámaras de cintas catódicas (CSC) Cada CSC tiene la forma de un trapecio y consiste de 6 volúmenes de gas, cada uno con un plano de cintas de cobre cargadas negativamente (cátodo) y un plano de cables cargados positivamente (ánodo) perpendicular al plano de las cintas. Alrededor de 468 cámaras CSC están ubicadas en las capas laterales, cada capa lateral esta constituida por cuatro estaciones denominadas ME1, ME2, etc. hasta MB4, de acuerdo a que tan distantes estan del eje de colisión. Las estaciones se distribuyen formando discos perpendiculares al haz de colisión, y dentro de cada disco las cámaras CSC forman dos anillos concéntricos (tres en el caso de MB1). En cada anillo hay 36 cámaras,

⁵CMS Collaboration, Op.cit.,p.92-140.

Figura 3.3: Distribución del sistema de detectores de muones



excepto para los anillos más internos del segundo al cuarto disco (ME2/1, ME3/1 y ME4/1) donde hay 18.

La ionización del gas y la subsecuente avalancha de electrones causada por una partícula cargada atravesando cada plano de una cámara, produce una señal en los alambres (ánodo) y también en las cintas (cátodo). Esta señal es muy rápida y la resolución espacial es cercana a $200 \mu m$.

3.2.3. Cámaras de placas resistivas (RPC) Las cámaras de placas resistivas son detectores gaseosos con una respuesta muy rápida y una buena resolución espacial. Por esta razón son parte esencial del sistema trigger para los muones, que esta encargado de filtrar los eventos importantes de la gran cantidad que se producirán en el LHC.

Una RPC consiste de dos placas paralelas, una cargada positivamente (ánodo) y otra cargada negativamente (cátodo), construidas de un material plástico resistivo $\approx 10^{10} - 10^{11} \Omega cm$ (bakelita). Están separadas por un volumen de gas de alrededor de 2 milímetros, y en su exterior están cubiertas por una capa de material conductor (grafito), y cintas de aluminio. Cuando un muon ó una partícula cargada atraviesa una RPC se produce una ionización en el volumen de gas, donde electrones desprendidos de los átomos chocan y liberan a otros consecutivamente generando un efecto de avalancha. Por el campo eléctrico entre las láminas, los electrones y los iones cargados positivamente se desplazarán al ánodo y cátodo respectivamente enviando una señal a través de las cintas de aluminio.

Un total de seis capas de RPCs están instaladas en la zona central ó zona del barril, dos localizadas en cada una de las estaciones MB1 y MB2 y una localizada en cada una de las estaciones MB3 y MB4 (figura 3.3). El que se eligiera colocar dos capas en las primeras estaciones se debe a que permitirá un mejor funcionamiento del algoritmo del trigger, lo que significa una mejor reconstrucción de las trayectorias siempre sobre la base de cuatro capas, incluso para partículas con bajo p_T las cuales son detenidas dentro del detector. En las capas laterales están instaladas tres capas de RPCs que cubren la región superior a $\eta = 2,1$ ⁶.

Por último además de los detectores se encuentran los sistemas de triggering y adquisición de datos, quienes seleccionan los eventos que posteriormente serán analizados.

3.3. BUNCH CROSSING

En LHC las partículas aceleradas viajan a lo largo de todo el anillo distribuidas en 2800 paquetes que se denominan bunches, cada uno de los cuales posee alrededor de 10^{11} protones y están separados aproximadamente 7 m . Esto significa que en condiciones normales el LHC será capaz de hacer colisionar dos bunches cada 25 ns ; es decir que se producirá un bunch crossing cada 25 ns . A una luminosidad de $10^{34}\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ y cerca de 20 colisiones por bunch crossing, habrá cerca de un billon de eventos por segundo.

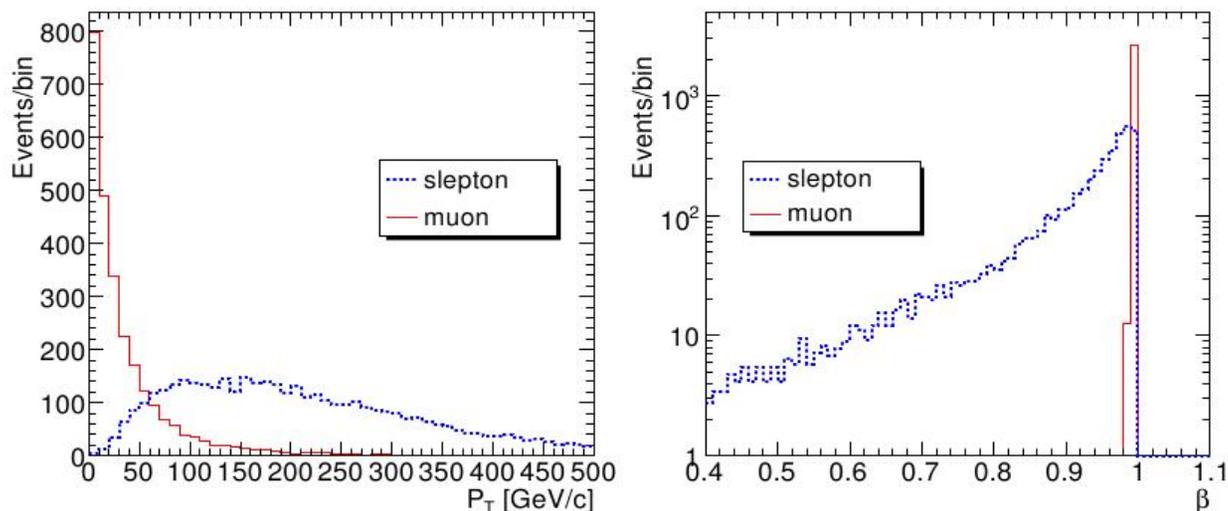
Los bunches de protones son formados en el Sincrotrón de Protones (PS) con una energía de 26 GeV. En el Super Sincrotrón de Protones (SPS) estos son acelerados a una energía de 450 GeV y finalmente inyectados dentro del LHC donde la energía incrementa 0.5 MeV por cada vuelta hasta alcanzar 7 TeV. Cada bunch es colimado hasta una sección de $\Delta x = \Delta y = 16\ \mu\text{m}$ y tiene una longitud de $7,48\text{ cm}$ (figura 3.4).

Figura 3.4: Características bunches LHC

Bunch Intensity	1.15×10^{11}
Number of bunches	2808
emittance	$5 \times 10^{-10}\text{ m}$
β^* fully squeezed	55 cm
beam size at IP	$16\ \mu\text{m}$
Crossing angle	285 μrad
Bunch length	1.06 ns (7.5 cm)
Luminosity	$10^{34}\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$
Total Beam energy	362 MJ per beam

⁶CMS Collaboration. CMS Physics Technical Design Report: The Muon Project. D.Acosta, 1997. v1, p. 249-309.

Figura 3.5: Distribuciones de p_T (izquierda) β (derecha) para muones y s-leptones en el modelo GMSB



TAREM, S et al. Trigger and Reconstruction for heavy long-lived charged particles with the ATLAS detector. En: ATLAS NOTE. ATL-SN-ATLAS-2008-071 (jun. 2008); p. 1-18.

Una RPC es capaz de detectar un evento en tiempos más cortos que los 25 ns requeridos entre dos bunch crossings sucesivos. Así el trigger que esta sincronizado en base a la respuesta de las RPCs puede identificar sin ambigüedad el bunch crossing correspondiente a la partícula cargada que ha dejado su rastro, inclusive con el alto background esperado en el LHC. Las señales de tales detectores envían directamente el tiempo y la posición de la partícula con una alta precisión. El sistema de trigger por su parte debe realizar tres funciones básicas simultáneamente basándose en las RPCs; identificar trayectorias que coincidan con las de los muones, asignar un bunch crossing a los candidatos y estimar sus momentos transversos.

3.4. SEÑALES DE HSCPS EN CMS

Después de haber estudiado los modelos teóricos que predicen la existencia de HSCPs, y haber realizado una descripción completa del detector CMS, el siguiente paso es conocer las señales que las HSCPs pueden dejar en el detector y explotar sus características más importantes para lograr identificarlas.

Como se explicó en las secciones anteriores los detectores de muones responden a la presencia de partículas cargadas; esto significa que estos detectores son aptos para determinar señales de HSCPs, como de los mismos muones. Sin embargo, debido a la diferencia fundamental entre las masas de las dos partículas, existirá también una diferencia significativa en la velocidad. Se espera por lo tanto que los muones salgan del punto de colisión con velocidades cercanas a la de la luz; de modo que el factor β será muy cercano a uno, mientras que las HSCPs viajarán con una velocidad menor y su factor β tendrá valores menores que 1. En la figura (3.5) se observa la simulación de s-leptones como ejemplo de HSCPs.

La diferencia en el momento transverso también es significativa, el espectro de p_T para la gran mayoría de muones es menor a 50 GeV , en cambio los s-taus tienen valores más altos conforme su masa aumenta. Determinar los lugares de solapamiento de las distribuciones de momento y velocidad entre muones y s-taus proporciona valiosa información sobre los sectores con la mayor eficiencia a la hora de identificar HSCPs. En estos sectores se harán cortes con el fin de eliminar partes de las señales y conseguir mejores resultados.

4 PRODUCCIÓN DE HSCPS EN CMS

Hasta el momento se ha revisado la teoría sobre HSCPs, los modelos involucrados y el comportamiento que distingue a dichas partículas. También se ha estudiado todo lo relacionado con el experimento CMS y en particular los detectores RPCs, que al igual que otros detectores están encargados de recibir la señal de partículas cargadas, y con los cuales se puede realizar el proceso de identificación de bunch crossing, como también la medición del tiempo de vuelo.

Ahora la siguiente etapa del trabajo consiste en obtener una señal de partículas pesadas, cargadas y estables que se podrían producir en las colisiones protón contra protón del LHC, y realizar un estudio detallado de sus características cinemáticas. Esta señal será simulada a través del programa PYTHIA y los resultados serán analizados en el programa ROOT.

4.1. SIMULADOR PYTHIA

Pythia es un programa generador de eventos basado en el método estadístico de Monte Carlo. Su objetivo es representar tan exacto como sea posible las propiedades de un evento en un gran rango de reacciones. Esto significa que dadas las partículas iniciales y la energía con la que se desea que colisionen, el sistema está en capacidad de generar la mayoría de subprocesos que podrían producirse a partir de esta colisión. Una extensa información es suministrada a través de elementos como subrutinas y funciones, switches y parámetros, de los que se escogen los más convenientes según el trabajo y análisis que se requiera ¹.

El programa original hasta las versiones más completas han sido escritas en lenguaje de programación fortran 77, sin embargo existe una adaptación de este simulador en lenguaje C++ como una librería en el programa de procesamiento de datos ROOT. De manera que se ejecutará el simulador dentro de ROOT y a continuación se analiza los resultados. Teniendo en cuenta la cantidad de HSCPs predichas por los modelos teóricos, se ha decidido trabajar en el campo de la supersimetría y en particular con los s-taus, candidatos predilectos para el título de HSCPs.

4.2. PRODUCCIÓN DE S-TAUS

Se produjo un número considerable de eventos consistentes en colisiones protón contra protón a una energía de centro de masa de $14 TeV$, tal y como se espera en el experimento. Algunos parámetros relacionados con la supersimetría al igual que ciertos subprocesos que involucran directamente la producción de s-taus, se escogieron en la construcción del programa (Ver tabla 4.1).

Aquí f_i se refiere a un fermión fundamental tal como $d, u, s, c, b, t, b', t', e^-, \nu_e, \mu^-, \nu_\mu$,

¹SJOSTRAND, T; MRENNNA, S y SKANDS, P. PYTHIA 6.4: Physics and Manual. En: FERMILAB-PUB-06-052-CD-T. arXiv:hep-ph/0603175 (Mar. 2006); 481p.

Tabla 4.1: Subprocesos supersimétricos implementados en la simulación

Subprocesos SUSY	
1	$f_i \bar{f}_i \rightarrow \tilde{\tau}_1 \tilde{\tau}_1^*$
2	$f_i \bar{f}_i \rightarrow \tilde{\tau}_2 \tilde{\tau}_2^*$
3	$f_i \bar{f}_i \rightarrow \tilde{\tau}_1 \tilde{\tau}_2^*$
4	$f_i \bar{f}_j \rightarrow \tilde{\tau}_1 \tilde{\nu}_\tau^*$
5	$f_i \bar{f}_j \rightarrow \tilde{\tau}_2 \tilde{\nu}_\tau^*$

SJOSTRAND, Op.cit.,p.1-481.

τ^- , ν_τ , $\tau^{-'}$, ν_τ' , y \bar{f}_i a su correspondiente antifermión; mientras que el símbolo * al lado de cualquier partícula supersimétrica se refiere a su respectiva antipartícula.

Los parámetros y subprocesos son activados mediante líneas de código establecidas por pythia, en un programa completo que más tarde es ejecutado en ROOT (...Ver anexo A...). Después de que el simulador ha completado su trabajo, los datos son almacenados en un árbol², para lograr un análisis más estructurado y un ahorro en memoria significativo. A partir de este empaquetamiento se puede construir una clase en la cual se especifica lo que se desea estudiar, que para este caso son los s-taus. Se selecciona entonces estas partículas definidas por un código y se crean histogramas donde variables dinámicas como momentum, energía, y masa son representadas.

Este proceso se realiza para varias masas de s-taus desde los 100 *GeV* hasta los 1500 *GeV* como también para muones; al final se compara las diferencias que resultan significativas para este trabajo como la velocidad y el momento transversal.

4.3. TÉCNICA DEL TIEMPO DE VUELO (ToF)

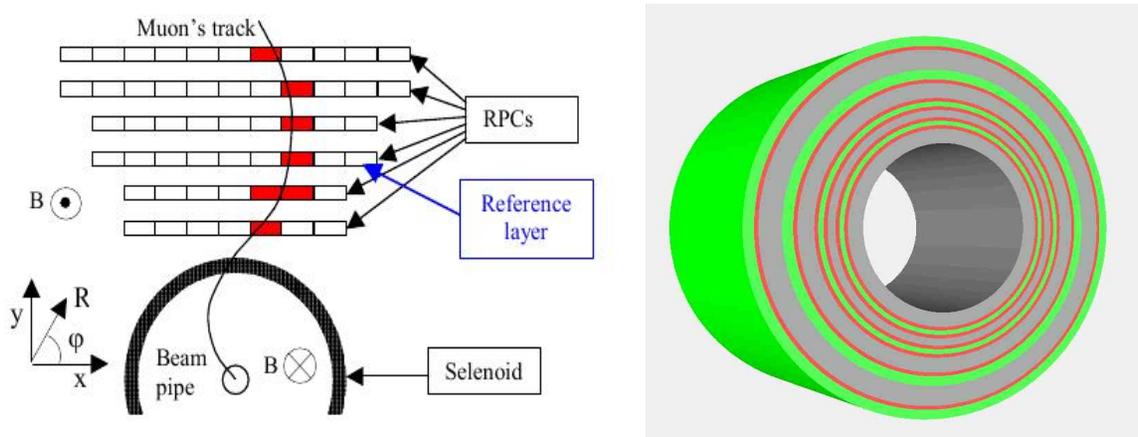
La técnica del tiempo de vuelo consiste en medir el tiempo que le toma a una partícula alcanzar un detector mientras viaja a través de una distancia conocida. Este método utilizado comúnmente por la espectrometría de masas para determinar la composición de diferentes sustancias, es ahora adaptado a la detección de partículas elementales. El detector puede discriminar entre una partícula ligera y una pesada usando la diferencia entre los tiempos de vuelo de ambas partículas. En el caso exclusivo del detector CMS y del acelerador LHC es necesario utilizar las herramientas que estos poseen, para determinar los tiempos de vuelo y así distinguir HSCPs.

Para describir la aplicación de la técnica del ToF en el detector CMS, se debe recordar que los bunch crossing (*bx*) (...ver sección 3.3...) se producirán cada 25 *ns*, asignándose a cada intervalo un valor, de manera que $bx = 0$ para un tiempo entre 0 – 25 *ns*, $bx = 1$ para un tiempo entre 25 – 50 *ns*, $bx = 2$ para un tiempo entre 50 – 75 *ns*, etc. Así por ejemplo,

²BRUN, R et al. ROOT Users Guide 5.2. 2008. 469p.

si una partícula cualquiera es detectada dentro del rango de tiempo entre 0 y 25 ns se le asigna $bx = 0$.

Figura 4.1: a.) Diagrama de la trayectoria de una partícula atravesando las capas de RPCs. b.) Modelo de capas cilíndricas en la zona del barril, los detectores RPCs están en color rojo, los DTs en verde y las capas de hierro y el solenoide en gris.



Los tiempos de vuelo se medirán entre el punto de colisión, que es el origen del sistema coordenado estándar de CMS (figura 4.1), hasta cada una de las capas de RPCs. La recolección de los datos por parte de las RPCs se realizará en lo que se denomina una ventana de tiempo, que por decirlo de alguna manera se abrirá cuando los muones arriben viajando a velocidades muy cercanas a la velocidad de la luz, y permanecerá así durante 25 ns , asignándole a cada evento dentro de este rango el bunch crossing 0. A eventos entre 25 y 50 ns les asignará el bunch crossing 1 y así sucesivamente. Ya que las HSCP presentarán un retraso con respecto a los muones, probablemente llegarán fuera de las ventanas de tiempo que les corresponden y se les asignará un bunch crossing superior al verdadero ³.

Entonces, la esencia del problema radica en conocer las diferencias entre las distribuciones de bx para las HSCP y para los muones en cada una de las capas de RPCs. Para lograr este objetivo es necesario desarrollar un modelo computacional que simule las trayectorias de partículas cargadas a través de los campos magnéticos del detector CMS y calcule los tiempos de vuelo para poder clasificarlos dentro de los distintos bunch crossings.

Para el desarrollo del programa es primordial considerar el movimiento de una partícula cargada en un campo magnético, que por supuesto es determinado por la fuerza de Lorentz. También es necesario hacer algunas consideraciones. En primer lugar se toman como constantes los dos campos magnéticos del detector CMS, y dirigidos en direcciones contrarias. Estos campos magnéticos se extienden a lo largo de todo el detector de la forma antes mencionada, sin tener en cuenta variaciones en las fronteras. En el cálculo de las trayectorias, se toma la energía de la partícula como una constante; esta afirmación es justificada porque las partículas masivas no pierden una cantidad significativa de energía en el paso por el detector.

³CARRILLO, Op.cit.,p.36.

En general, las partículas cargadas pueden perder energía en su interacción con la materia a través de procesos como: colisiones inelásticas con los electrones de los átomos de determinado material, dispersiones elásticas del núcleo, emisión de radiación de Cherenkov, y bremsstrahlung ó radiación de sincrotrón. De todas las formas anteriores, la más significativa para partículas masivas y cargadas es la primera; las colisiones inelásticas son las responsables por la mayor cantidad de energía perdida en HSCPs, y ocurren con una cierta probabilidad. Sin embargo debido a su gran número, generalmente se trabaja con el promedio de energía perdida por unidad de longitud recorrida, ó stopping power $\frac{dE}{dx}$. Su comportamiento depende de la velocidad; en el límite no relativista es proporcional al cuadrado inverso de β y a medida que la velocidad aumenta se vuelve proporcional a β . Los valores de $\frac{dE}{dx}$ para HSCPs no exceden los cientos de MeV, por lo que su efecto en la variación de la trayectoria es despreciable.

Las dispersiones elásticas ocurren frecuentemente, pero no en la misma cantidad que las colisiones inelásticas. La radiación de Cherenkov es dependiente de la velocidad al igual que el stopping power, y en un cálculo correcto de $\frac{dE}{dx}$ ya estaría incluida. Por último el bremsstrahlung contribuye sustancialmente solo en el caso de partículas livianas como electrones y positrones. La energía por unidad de tiempo varía de acuerdo a m^{-4} cuando la aceleración es perpendicular a la velocidad; y la probabilidad de emisión varía como $\sigma \sim r_e^2 = (\frac{e^2}{mc^2})^2$, de forma que la radiación perdida por los muones, por ejemplo, es casi 40000 veces menor que aquella para electrones ⁴. Para HSCPs esta cantidad sería mucho menor, por lo que no tiene sentido considerarla. El desarrollo de las ecuaciones de movimiento se muestra ...en el Anexo B...

En el modelo geométrico construido en la simulación, las capas de RPCs en la zona del barril son superficies cilíndricas concéntricas alrededor del eje de colisión (figura 4.2); en el sistema coordenado cartesiano hablaríamos del eje z . En las zonas laterales las capas son tomadas como discos, también con el eje de colisión como eje principal. Ninguna clase de material es considerado en la propagación de las partículas.

El campo magnético de 4 Teslas es tomado en la dirección positiva del eje z , mientras que el de 2 Teslas en la dirección negativa. En las figuras (4.3, 4.4) se puede apreciar el desplazamiento que caracteriza a una partícula cargada negativamente como el muón, a través de dos campos magnéticos constantes e independientes. Estas trayectorias fueron producidas por el programa computacional diseñado para medir el tiempo de vuelo, como una prueba de su correcto funcionamiento; los valores iniciales de momentum y energía fueron extraídos desde la simulación correspondiente de pythia.

⁴LEO, R. Techniques for Nuclear and Particles Physics Experiments. 2nd Ed. New York: Springer-Verlag, 1994. 378p. ISBN 0-387-57280-5.

Figura 4.2: Geometría aproximada de las capas de RPCs para el desarrollo de la simulación. Los sectores en color rojo indican las capas de RPCs, los sectores en color azul las cámaras CSCs, las zonas verdes DTs, y las partes grises capas de hierro y el solenoide.

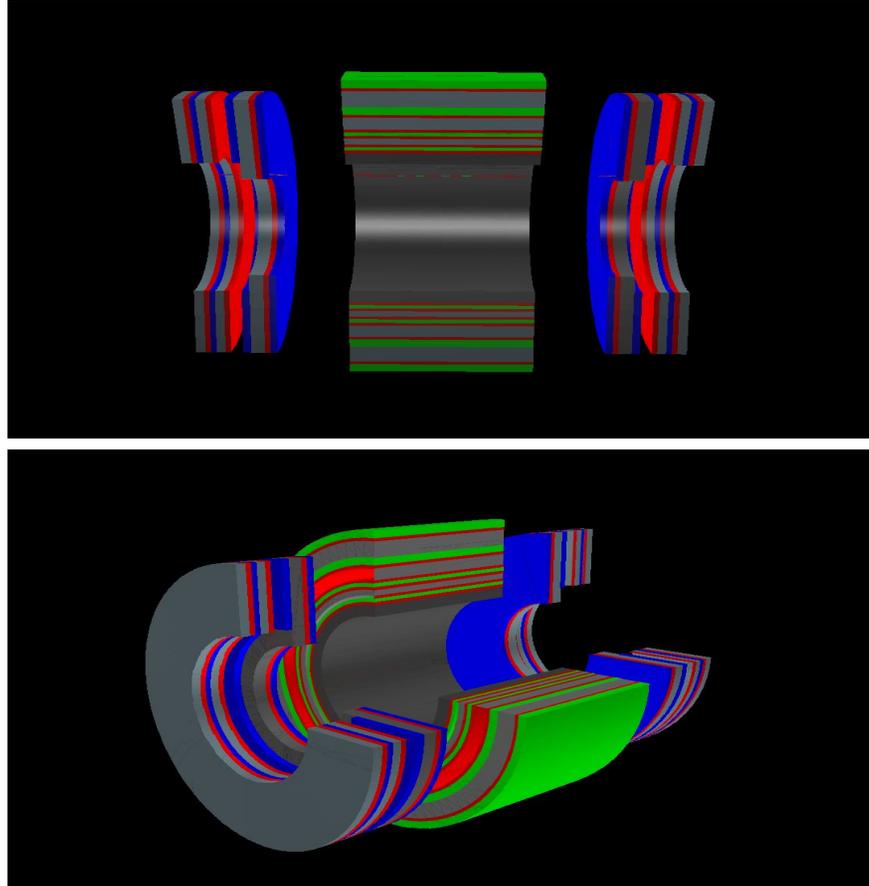


Figura 4.3: a.) Simulación del movimiento de un muón a través del detector CMS, los círculos concéntricos indican los campos magnéticos separados por el magneto. El campo magnético interior esta dirigido hacia fuera de la hoja, y el exterior hacia dentro de la misma b.) En esta figura se indica los radios de curvatura de la trayectoria del muón.

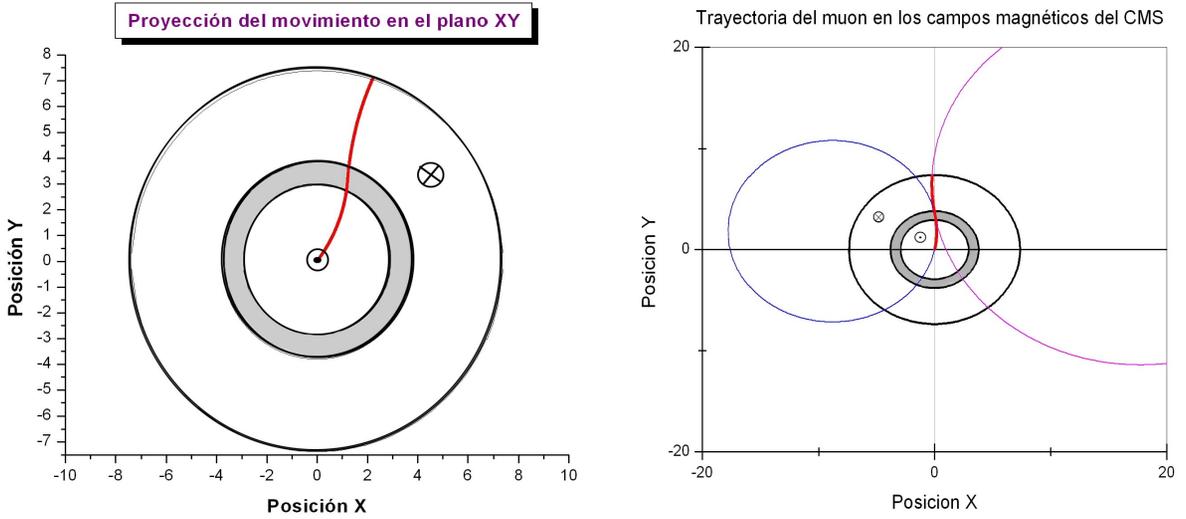
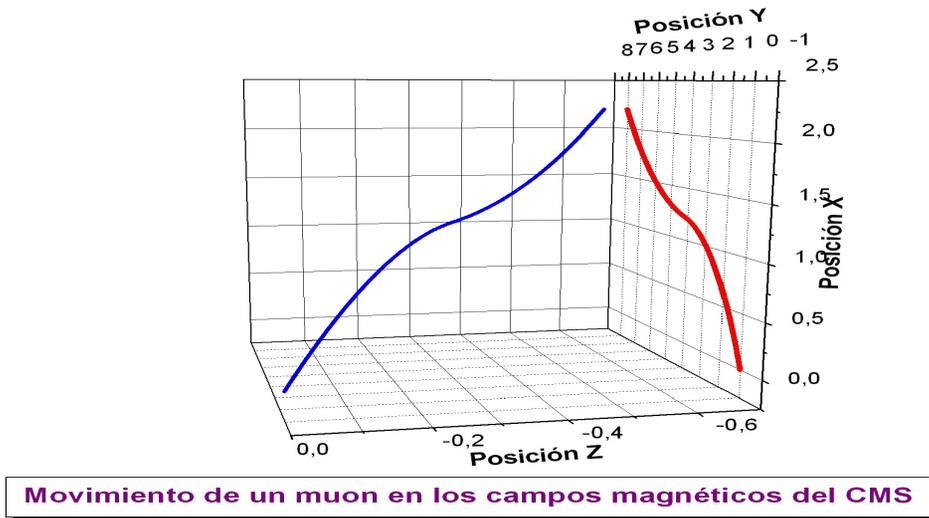


Figura 4.4: Trayectoria en tres dimensiones de un muón producido por pythia, con una proyección sobre el plano $x-y$. Los campos magnéticos como se explicó están dirigidos en direcciones contrarias.



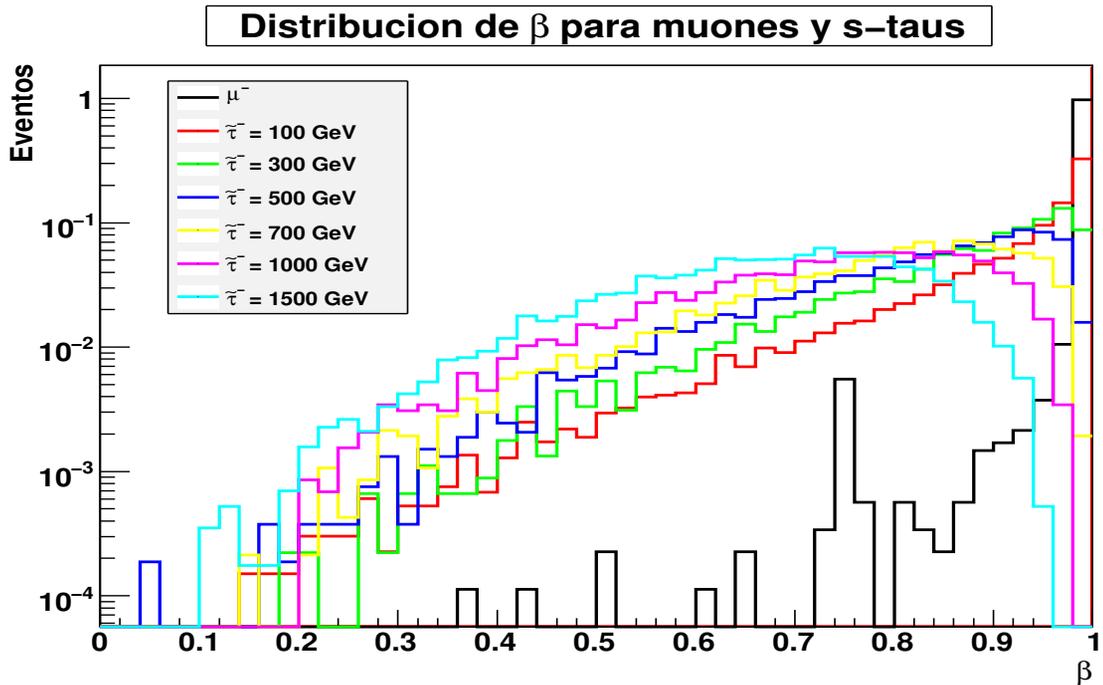
Movimiento de un muon en los campos magnéticos del CMS

5 RESULTADOS

Después de conocer los métodos con los cuales se desarrolló todo el proceso de simulación, tanto de las partículas, el tiempo de vuelo, y la asignación de bunch crossing, se procede en este capítulo a mostrar los correspondientes resultados que se obtuvieron. En primer lugar se analiza la producción de s-taus y muones comparando sus diferencias y características principales. Por último se presenta las distribuciones de bunch crossing para HSCPs de diferentes masas en todas las capas de RPCs.

5.1. PRODUCCIÓN DE S-TAUS

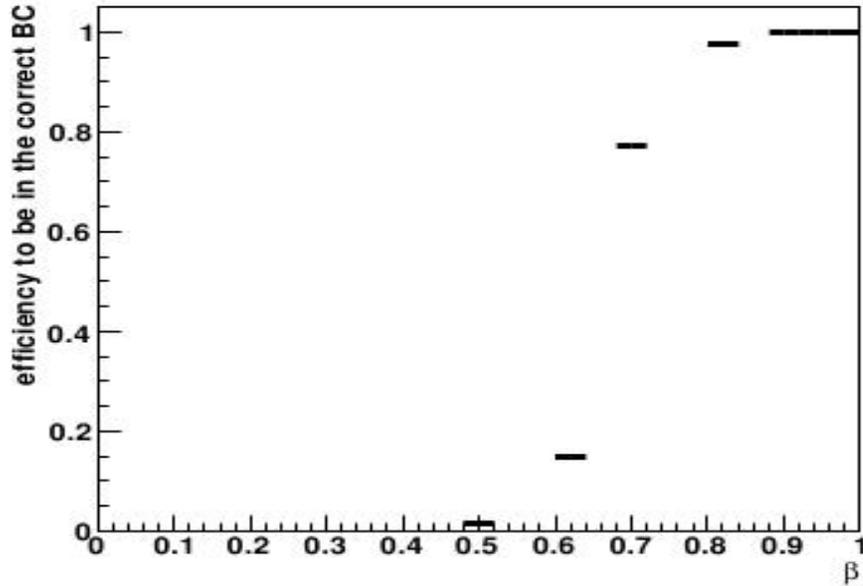
Figura 5.1: Distribuciones normalizadas de β para muones y s-taus.



Como se explicó ... en la sección 4.2... se han producido en pythia s-taus con diferentes masas. A partir de sus valores de momento y energía se puede obtener la relación entre su velocidad y la velocidad de la luz, es decir β . Las distribuciones se muestran en la figura (5.1). Es claro que para partículas con masas mucho menores a los 100 GeV como los muones, sus valores de β son muy cercanos a 1, lo que significa que cuando se forman en las colisiones de protones dichas partículas viajan a velocidades muy cercanas a la velocidad de la luz. A medida que la masa aumenta los valores correspondientes de β se alejan de 1, tal y como era de esperarse.

De esta primera observación se puede afirmar que β como una regla de selección de HSCPs,

Figura 5.2: Estudio de eficiencia como función de β , en la asignación correcta de bunch crossing. Este valor desciende abruptamente para $\beta < 0,7$.



TAREM, Op.cit.,p.1-18.

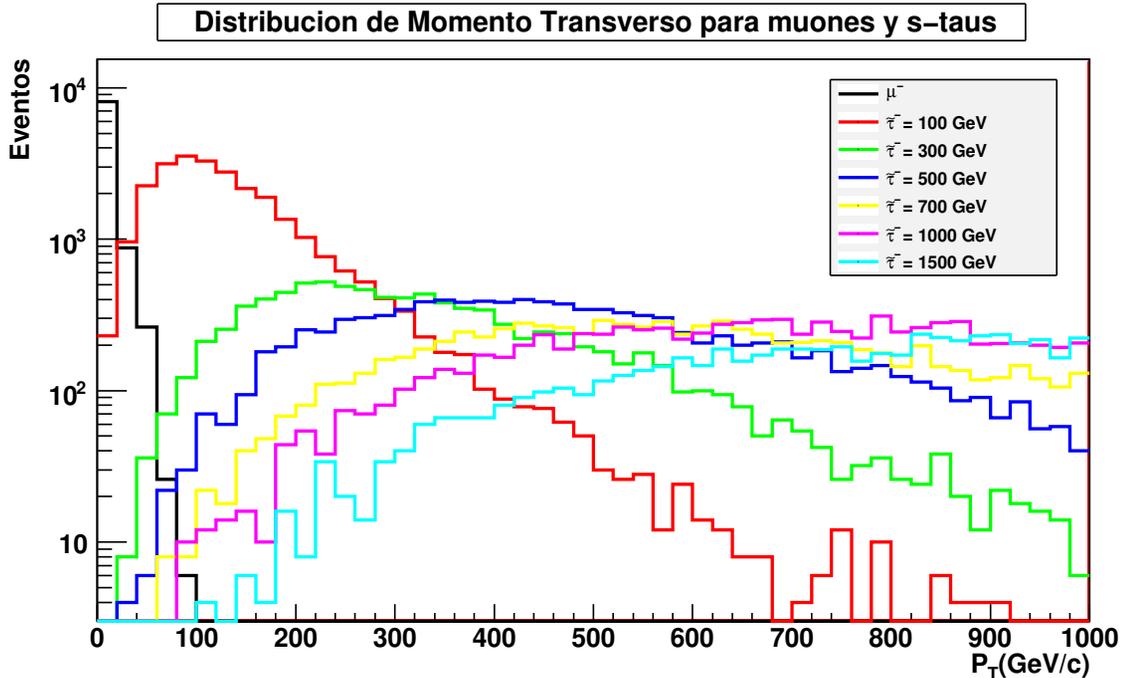
debe ser acotada a cierto rango para maximizar su eficiencia y descartar el background producido por los muones. Cuando una HSCP es muy rápida no puede ser identificada porque se comporta como un muón desde el punto de vista del detector, y cuando es demasiado lenta no llegará en el máximo número de bunch crossings asignados al mismo evento. En el estudio hecho por TAREM, S et al¹ (figura 5.2), se puede apreciar que un buen intervalo de valores se encuentra para $\beta < 0,7$, en donde la asignación de bunch crossing comienza a ser errada, lo que naturalmente es esperado de una HSCPs.

En la figura (5.3) se indican las distribuciones de momento transverso, y se observa que para los muones esta cantidad es menor que para los s-taus, donde a medida que su masa aumenta sus valores crecen. A partir de $p_T > 20 GeV$ se presentan señales de s-taus separadas del background debido a los muones. Además, como el momento transverso es proporcional al radio de curvatura en el movimiento de una partícula cargada en un campo magnético, se espera que para los muones este radio sea menor, o sea su curvatura será más pronunciada que para los s-taus, lo que también es un resultado esperado.

Otra de las características de las partículas producidas, es la dirección en la que salen a partir del punto de colisión. Para obtener una apreciación en este sentido, se generan las distribuciones de pseudorapidez mostradas en la figura (5.4). Teniendo en cuenta lo anterior se puede ver de las distribuciones, que los muones se dispersan de manera casi uniforme a través de todas las direcciones, en cambio los s-taus tienden a dispersarse en direcciones cada

¹TAREM, S et al. Trigger and Reconstruction for heavy long-lived charged particles with the ATLAS detector. En: ATLAS NOTE. ATL-SN-ATLAS-2008-071 (jun. 2008); p. 1-18.

Figura 5.3: Distribuciones de p_T para muones y s-taus.



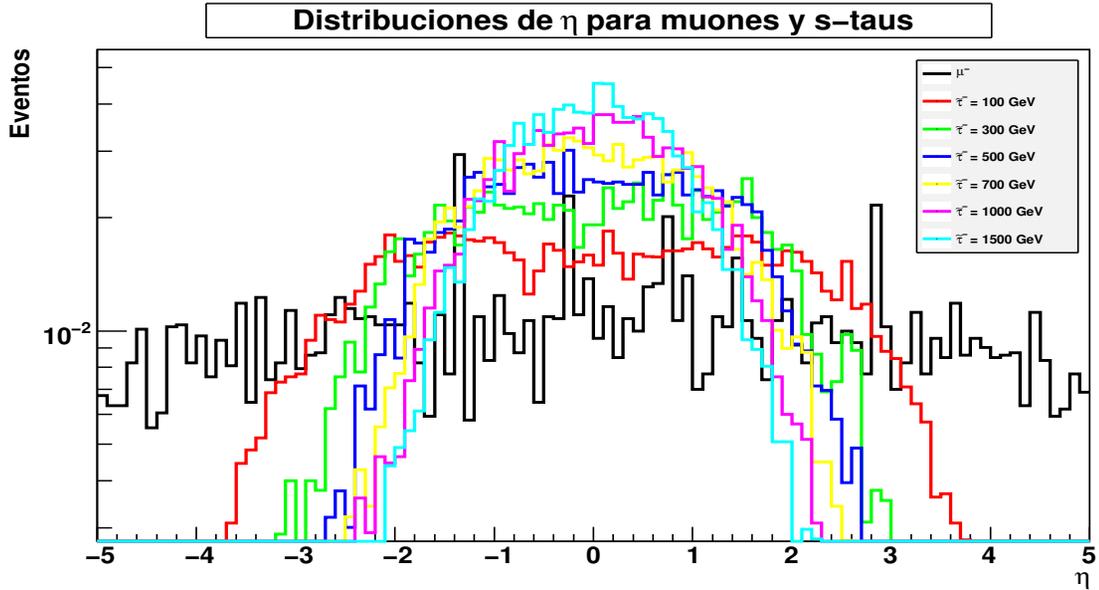
vez más alejadas del eje de colisión, en la medida que su masa es mayor. Para tener una idea de la relación con los valores de η en el detector CMS, recordemos que las estaciones de muones cubren una región entre $-2,4$ y $2,4$, mientras que las cámaras de RPCs se encuentran a partir de $|\eta| < 1,6$ (figura 3.2).

5.2. IDENTIFICACIÓN DE HSCPS

En el estudio de los resultados derivados de la simulación de los tiempos de vuelo, se comenzará con las distribuciones de bunch crossing de las partículas producidas anteriormente, sin ningún tipo de restricción en sus variables cinemáticas. Más adelante se filtrarán ciertos rangos de datos que imposibilitan observar de manera clara la identificación de HSCPs.

5.2.1. Resultados Preliminares En las figuras (5.5, 5.6) se presentan las distribuciones de bunch crossing para la zona del barril, y para las capas laterales respectivamente. Como lo mencionamos, hay seis capas de RPCs en la zona del barril y tres capas en cada zona lateral, que se han nombrado como izquierda y derecha con respecto al sistema de coordenadas de CMS. Es claro que por la alta velocidad que llevan los muones al salir del punto de colisión, comparable con la velocidad de la luz, no habrá retraso alguno en ninguna de las capas, y las cámaras RPCs clasificarán a todos estos eventos dentro del bunch crossing cero (0) del que fueron producto. Es decir que todas estas partículas llegaron dentro de la ventana de tiempo correspondiente.

Figura 5.4: Distribuciones de pseudorapidez para muones y s-taus.



Para el caso de los s-taus con una masa de 100 GeV (figuras 5.7, 5.8), algunas de las partículas producidas que poseen una velocidad baja, llegan a las capas de RPCs fuera de la ventana de tiempo y caen dentro de un bunch crossing superior. Se puede observar aunque no de manera exaltante, como el número de eventos fuera del bunch crossing 0 va incrementando conforme las capas están más alejadas del punto de partida.

Lo mismo se observa para s-taus de 500 GeV (figuras 5.9, 5.10), aunque de manera más notoria. Hay una diferencia significativa también entre las distribuciones para la zona central o zona del barril y las zonas laterales. En la zona del barril los bins pertenecientes a $bx = 1$ y $bx = 2$ crecen conforme el número de la capa aumenta, entre más alejadas están las cámaras de RPCs más notoria es la errónea asignación de bunch crossing. Sin embargo en las zonas laterales donde el número de capas es menor, no se puede distinguir el crecimiento de los eventos en los bunch crossing mencionados.

Figura 5.5: Distribuciones de bunch crossing para muones en la zona del barril

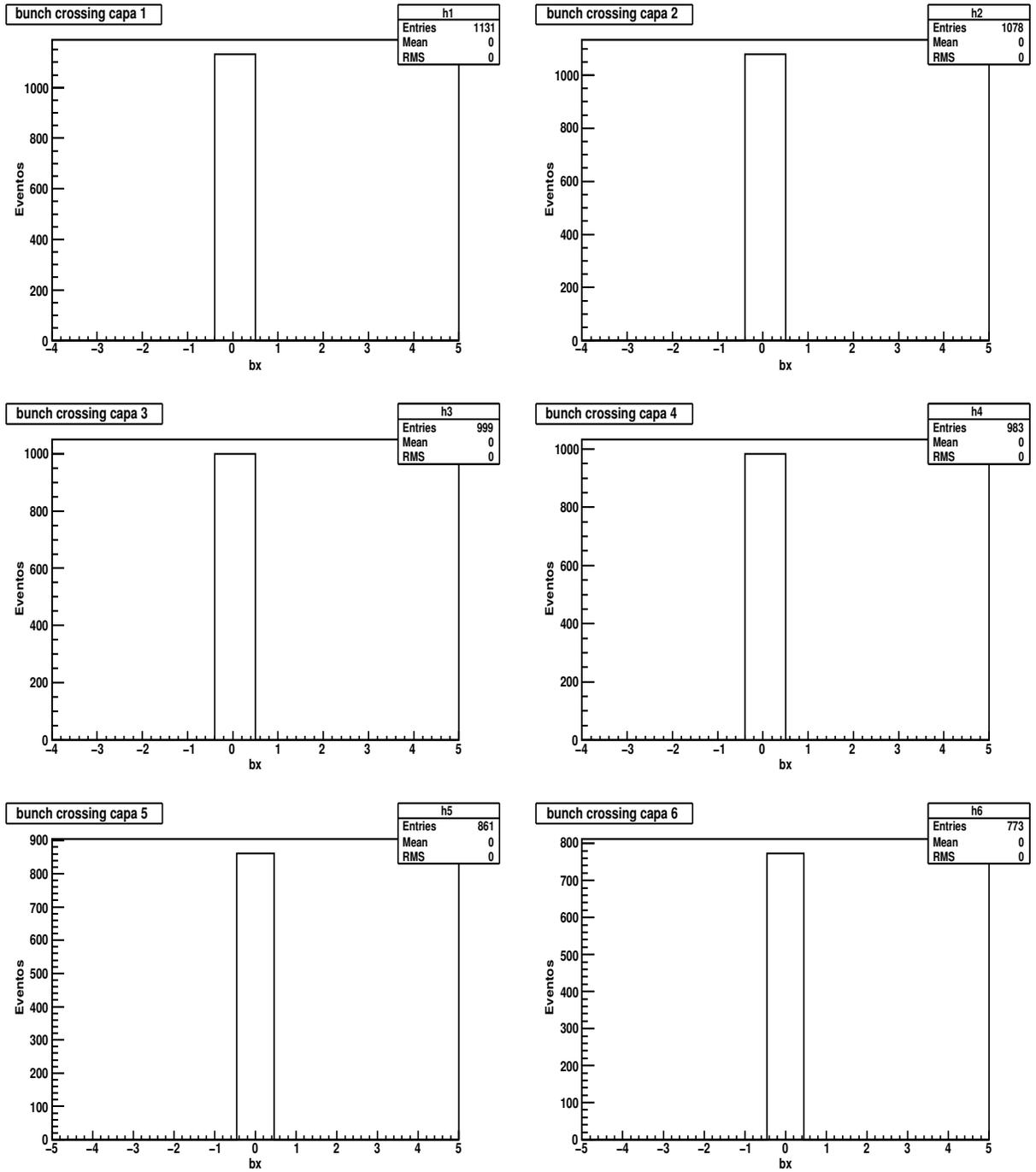


Figura 5.6: Distribuciones de bunch crossing para muones en las zonas laterales

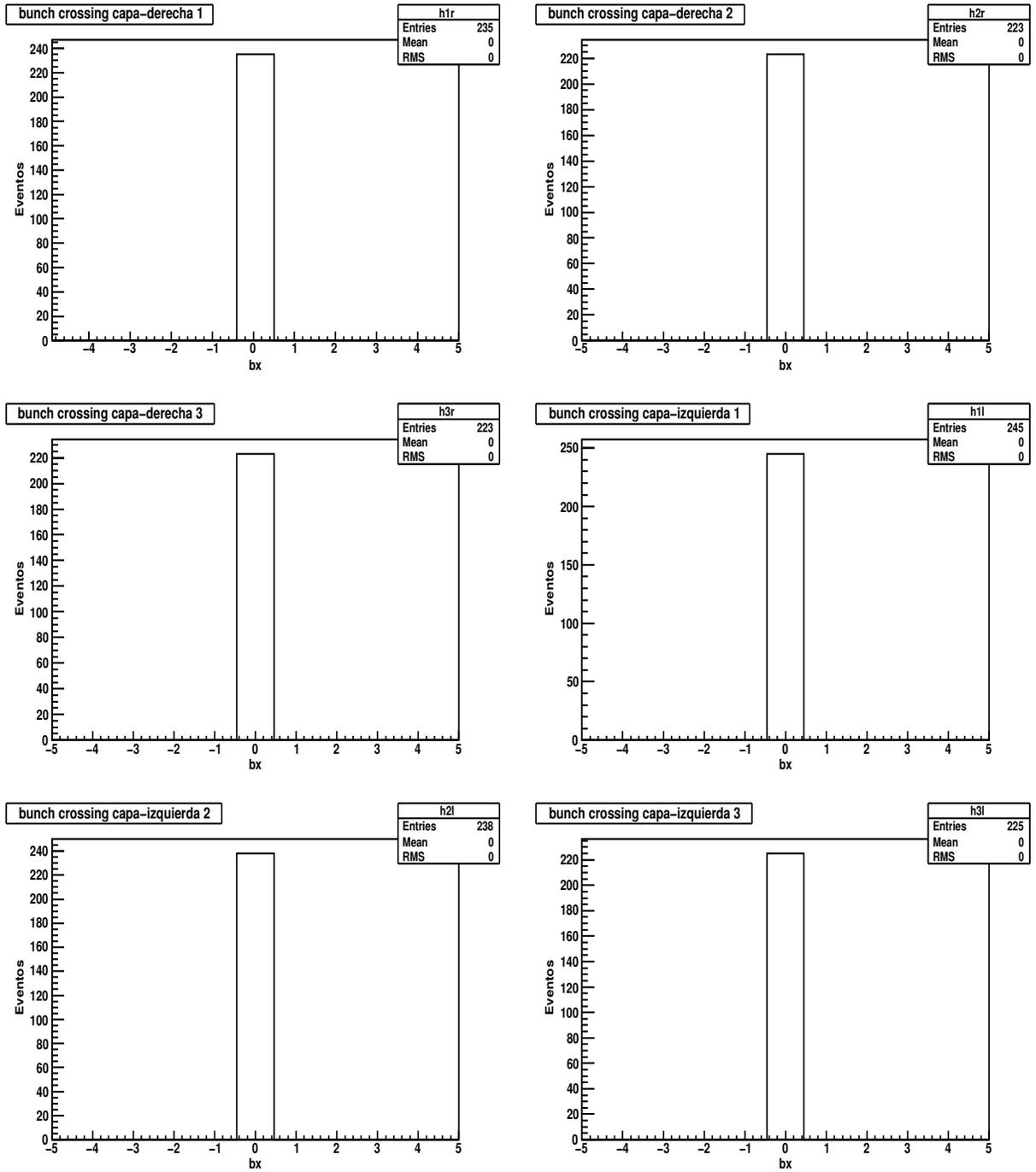


Figura 5.7: Distribuciones de bunch crossing para $\tilde{\tau} = 100 \text{ GeV}$ en la zona del barril

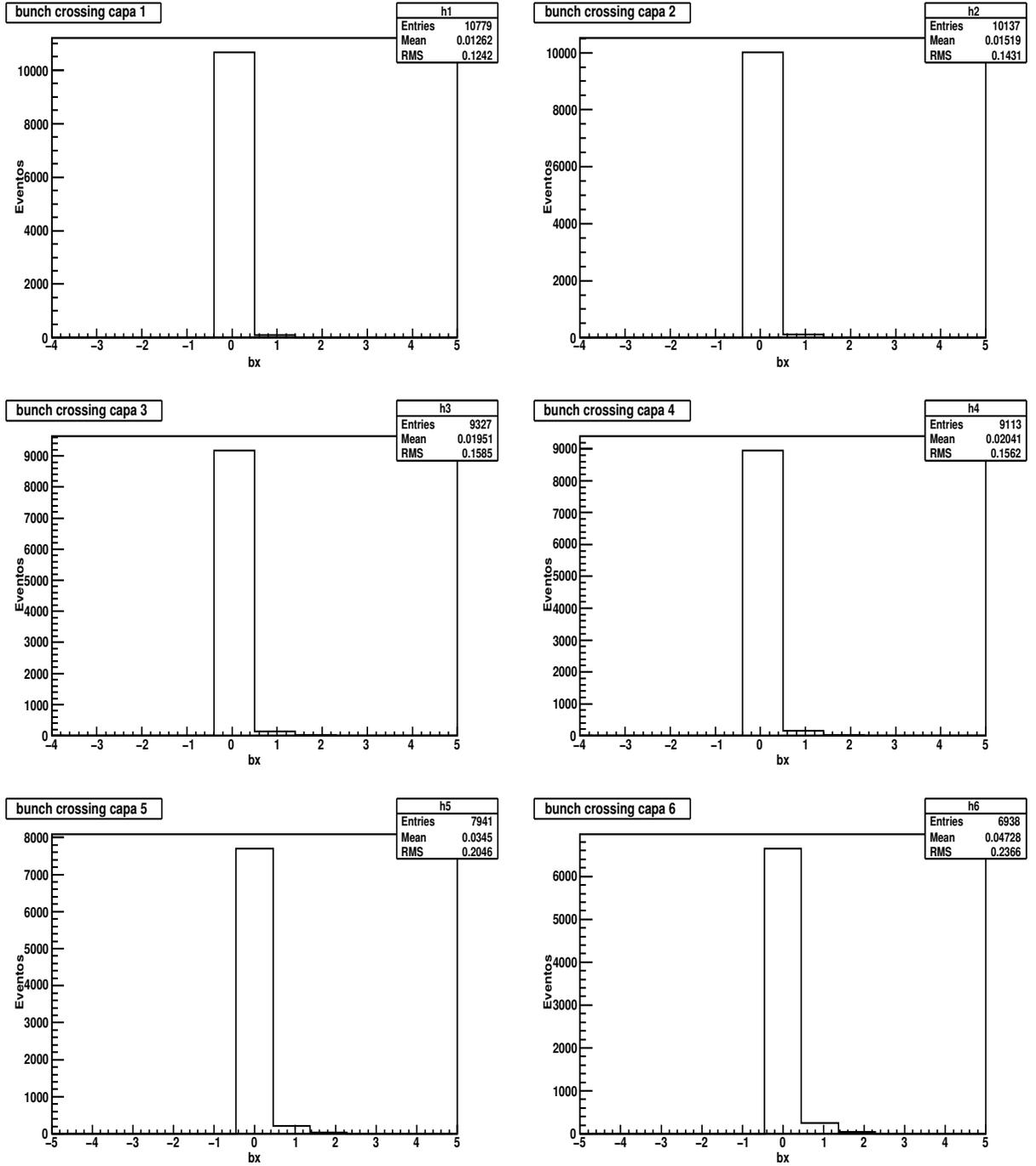


Figura 5.8: Distribuciones de bunch crossing para $\tilde{\tau} = 100 \text{ GeV}$ en las zonas laterales

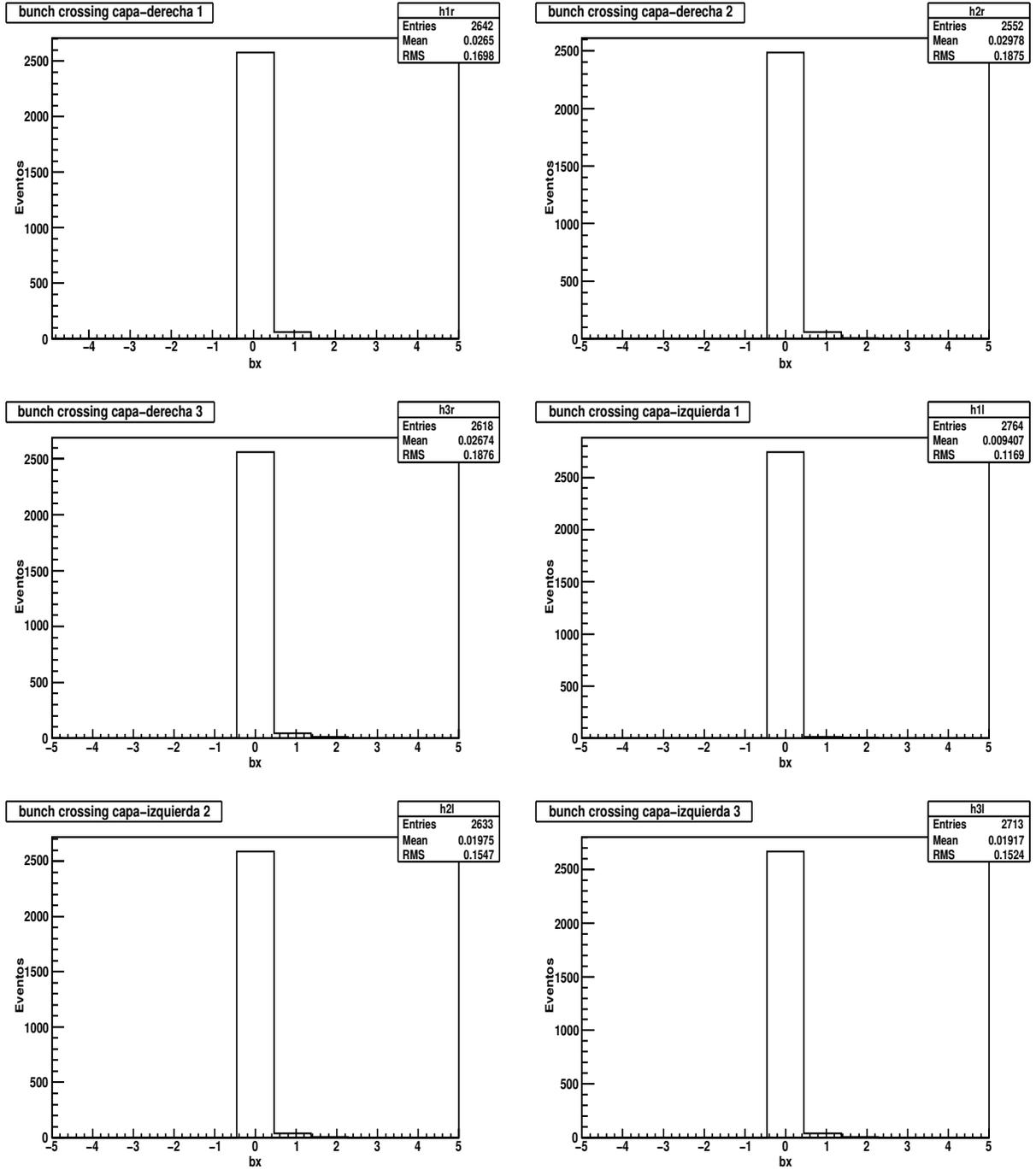


Figura 5.9: Distribuciones de bunch crossing para $\tilde{\tau} = 500 \text{ GeV}$ en la zona del barril

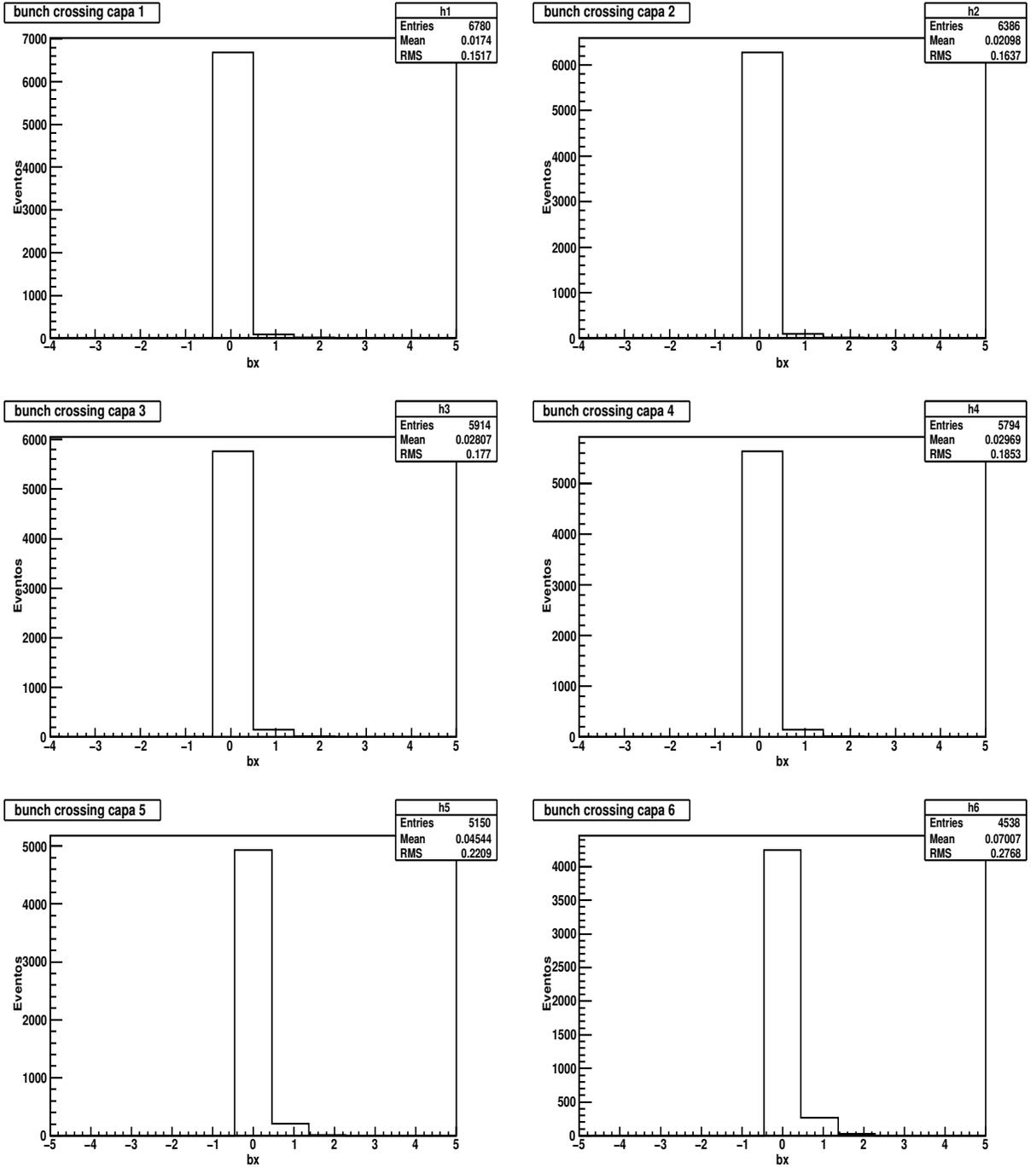
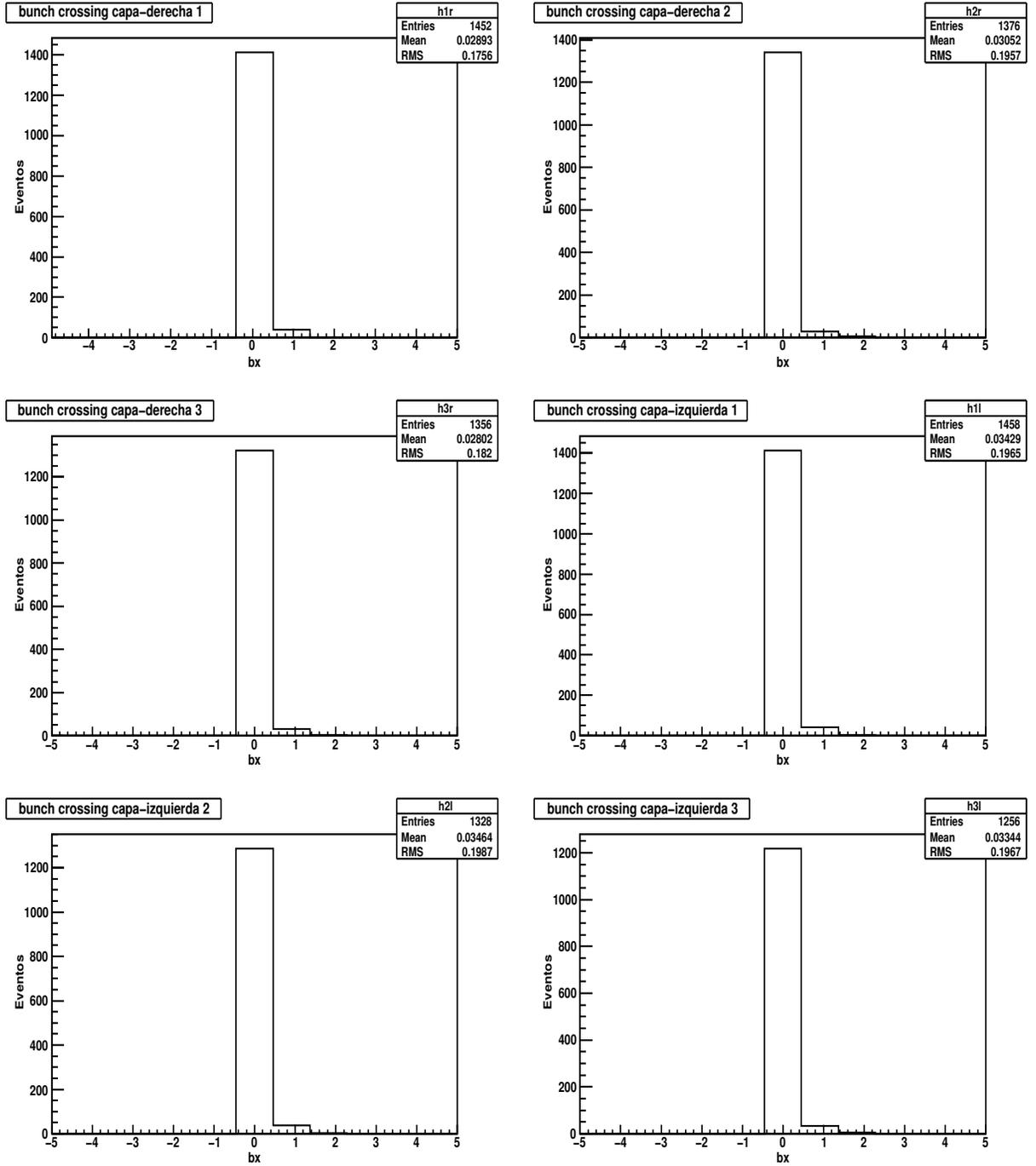


Figura 5.10: Distribuciones de bunch crossing para $\tilde{\tau} = 500 \text{ GeV}$ en las zonas laterales



5.2.2. Selección de β y p_T Ahora se presentan los resultados cuando se han realizado ciertos cortes para las variables β y p_T . La selección de valores para el momento transversal se realiza a partir de los 20 GeV como se observó en la sección anterior, donde se excluye casi por completo a los muones. En cuanto a β , se escoge un rango menor a 0,7 de acuerdo con el estudio de eficiencia y el background presentado por muones. Las distribuciones de bunch crossing se realizan para las mismas masas de $\tilde{\tau}s$, sin incluir por supuesto a muones, que ya han sido descartados.

En la figura (5.11) se encuentran los histogramas para s-taus de 100 GeV en la zona del barril, aquí se observa como $bx = 1$ aumentó su valor al igual que $bx = 2$, y lo hace de manera gradual conforme el número de capa aumenta. En la figura (5.12) se encuentran los histogramas para s-taus de 100 GeV en las capas laterales. El aumento de bunch crossing superiores a 0 es considerable comparada con la figura (5.8). Sin embargo se observa que en las capas derechas y sobre todo en las izquierdas el aumento de bx no es gradual; por ejemplo, en las capas izquierdas $bx = 1$ crece, pero $bx = 2$ disminuye desobedeciendo el patrón de búsqueda.

En las figuras (5.13, 5.14) se indican los mismos resultados para s-taus con una masa de 500 GeV . Debe notarse que a medida que la capa está más lejos del punto de producción, el número de eventos que llegan a cada una de estas disminuye. Aun así este valor sube consecutivamente para $bx = 1$ y $bx = 2$ en la zona central. Pareciera ocurrir lo mismo en las capas laterales, pero vemos que el número de eventos detectados varía entre algunas capas sin un orden, en algunos casos disminuye y en otros aumenta. Esto puede deberse a la desviación producida por los campos magnéticos pero sobre todo a que las capas laterales son solo tres en cada lado y cubren un región menor con respecto a la zona del barril.

Figura 5.11: Distribuciones de bunch crossing para $\tilde{\tau} = 100 \text{ GeV}$ en la zona del barril con $\beta < 0,7$ y $p_T > 20 \text{ GeV}$.

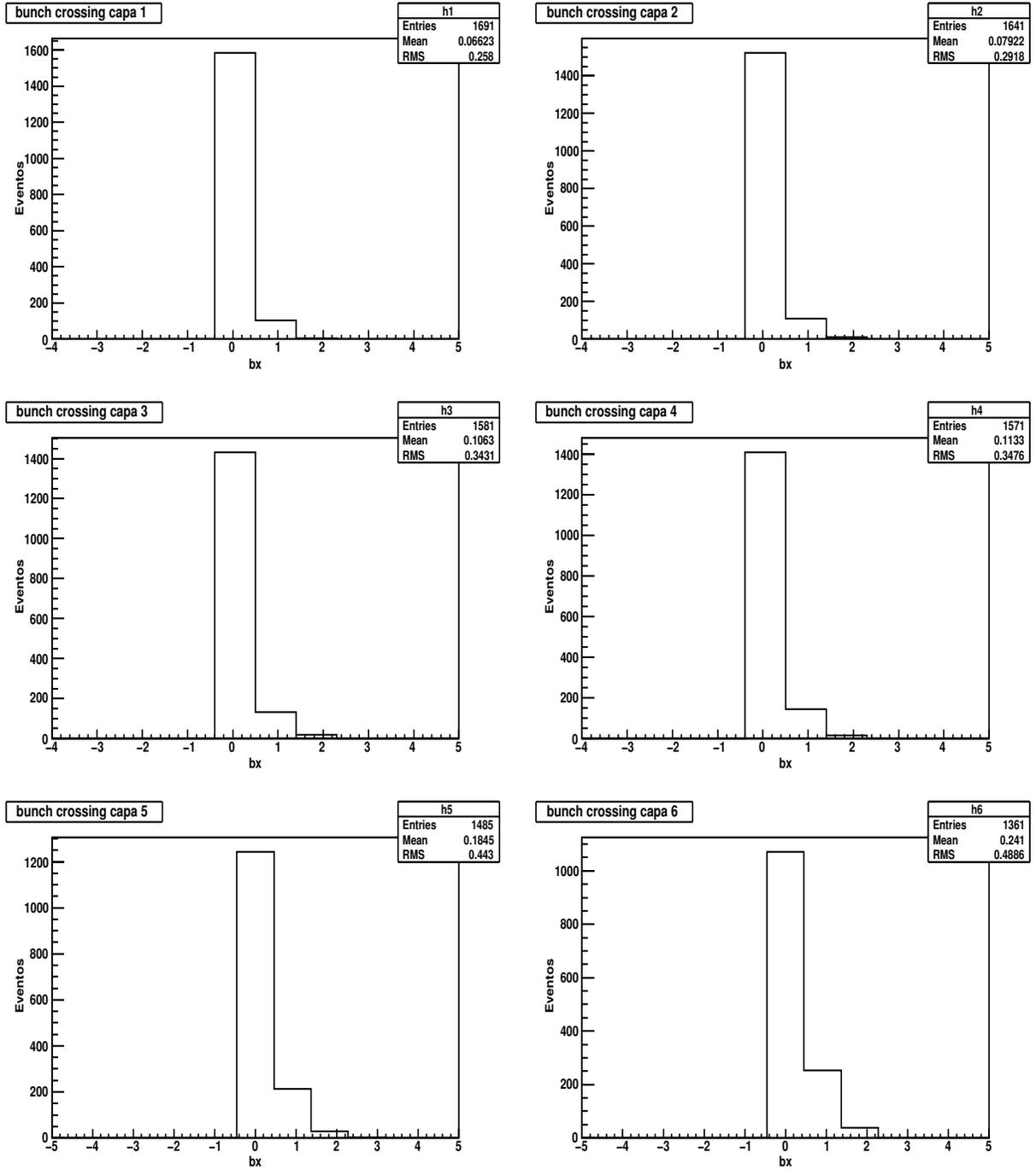


Figura 5.12: Distribuciones de bunch crossing para $\tilde{\tau} = 100 \text{ GeV}$ en las zonas laterales con $\beta < 0,7$ y $p_T > 20 \text{ GeV}$.

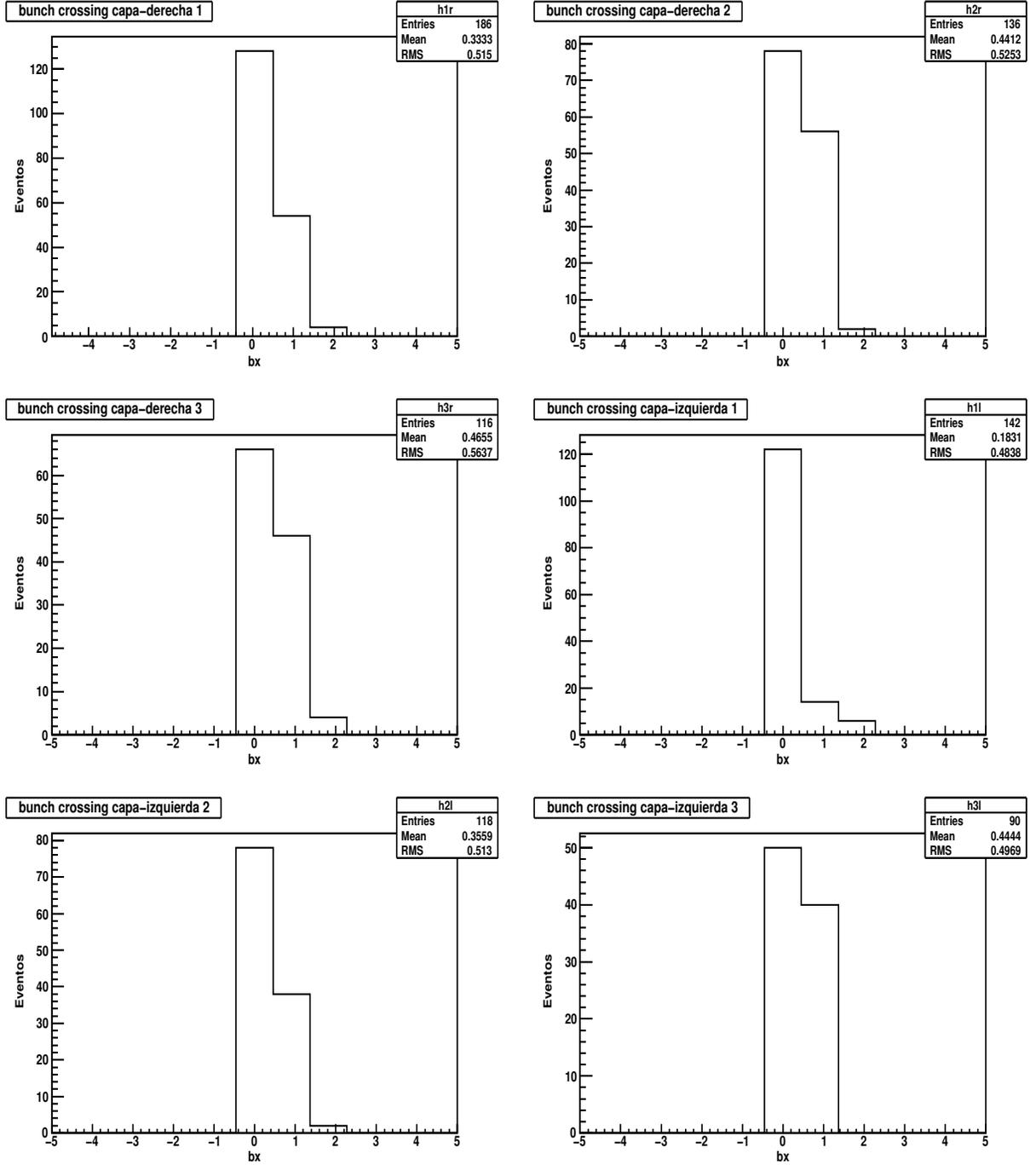


Figura 5.13: Distribuciones de bunch crossing para $\tilde{\tau} = 500 \text{ GeV}$ en la zona del barril con $\beta < 0,7$ y $p_T > 20 \text{ GeV}$.

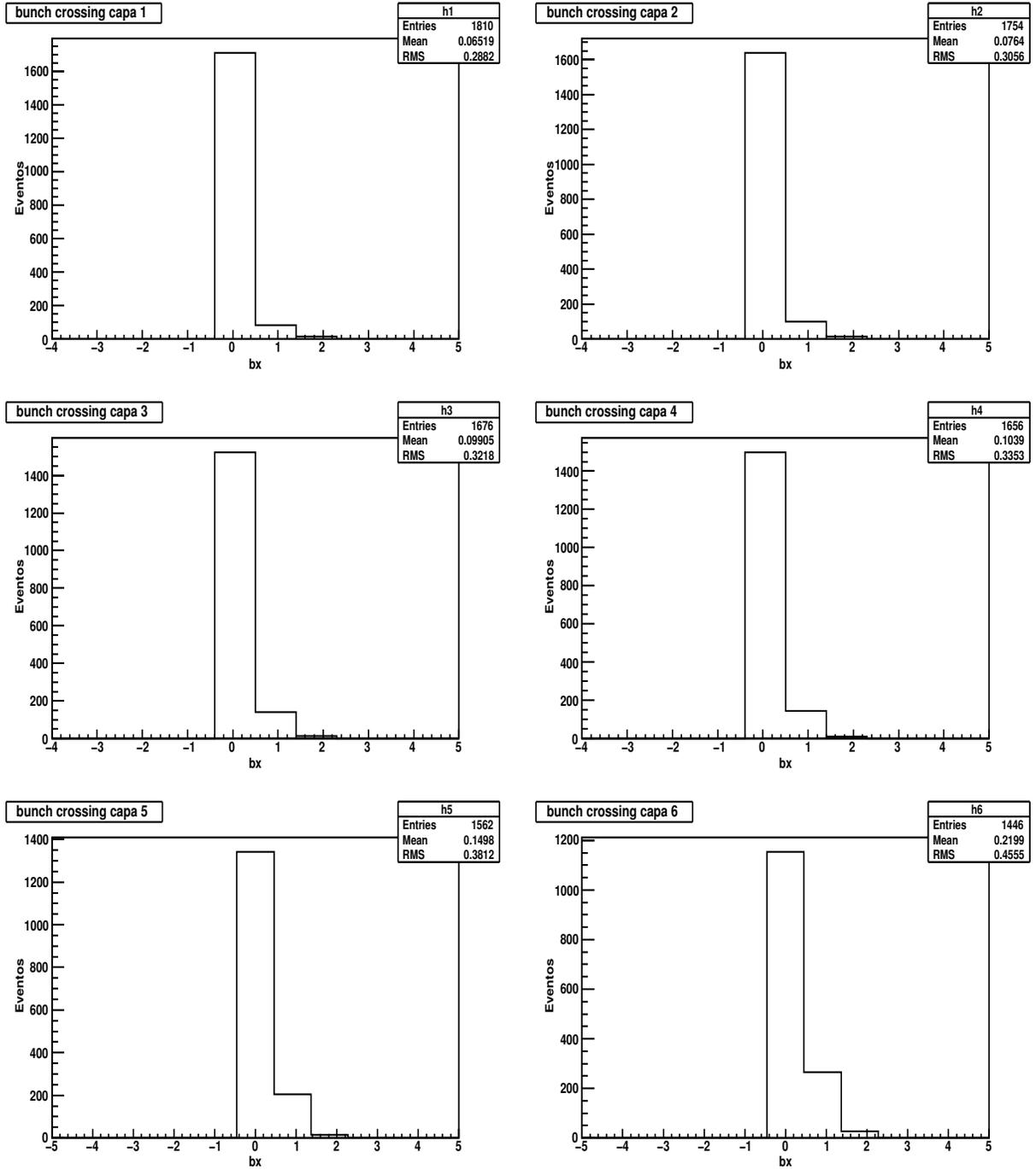
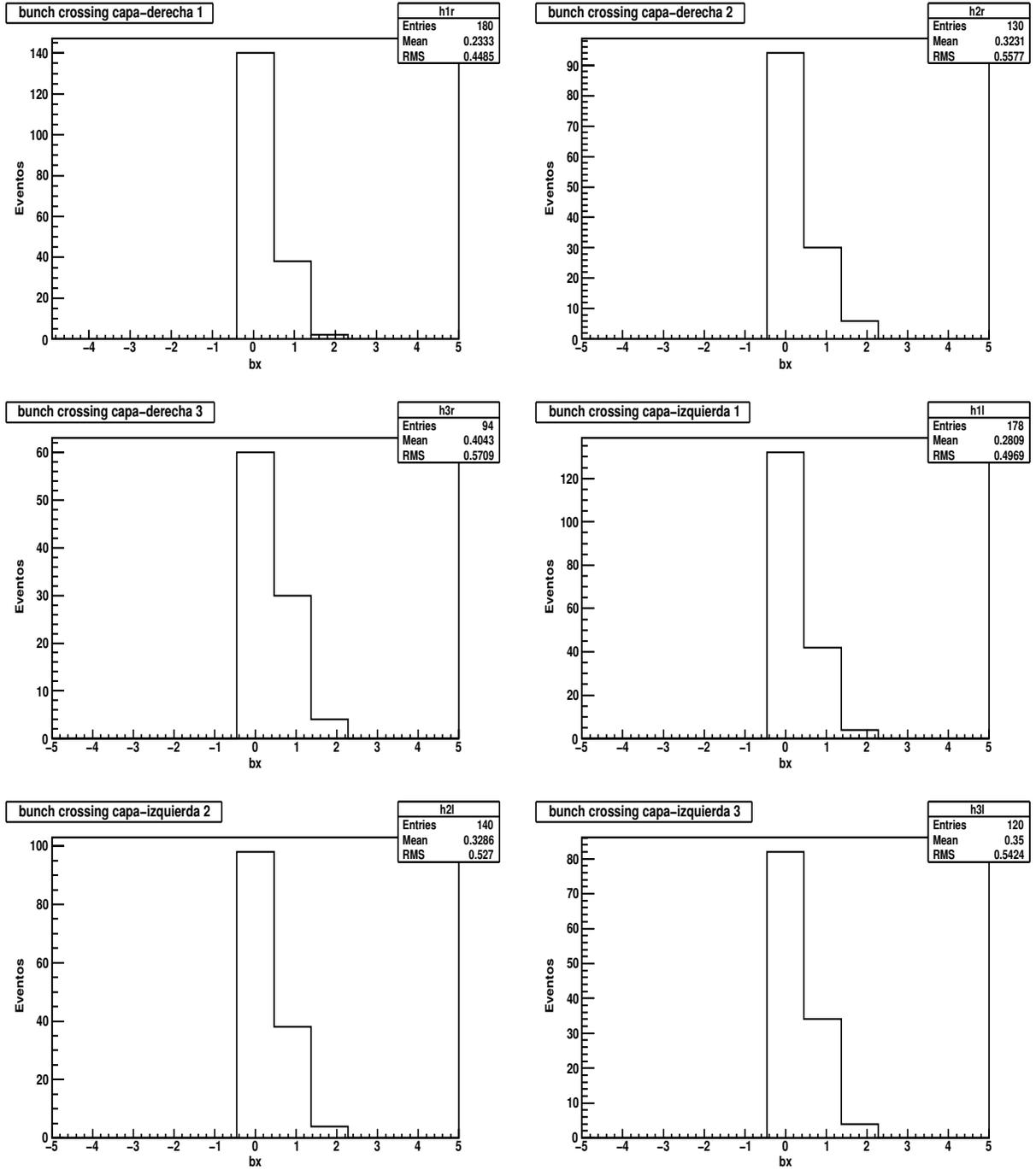


Figura 5.14: Distribuciones de bunch crossing para $\tilde{\tau} = 500 \text{ GeV}$ en las zonas laterales con $\beta < 0,7$ y $p_T > 20 \text{ GeV}$.



6 CONCLUSIONES

En el estudio de las señales simuladas para s-taus como ejemplo de HSCPs, y para muones como el principal factor de background, se establecieron sus diferencias cinemáticas utilizando distribuciones de β y p_T ; y se reiteró el papel de la velocidad, como la regla de selección para la identificación de HSCPs. Las diferencias en las velocidades permiten, que mediante las asignaciones de bunch crossing a cada evento, en cada capa de RPCs, sea posible distinguir entre s-taus y muones. Esto fue precisamente lo que se observó al comparar las distribuciones de bx para las dos clases de partículas, en los dos casos planteados. En el primer caso cuando la masa del $\tilde{\tau}$ es igual a 100 GeV , y en el segundo cuando la masa es igual a 500 GeV . Cuanto mayor es la masa, menor es su velocidad, y el crecimiento de bunch crossings asignados fuera de las ventanas de tiempo correspondientes, son más evidentes.

El corte en el rango de valores posibles de β para ambas partículas, basado en el estudio hecho por TAREM, S et al.¹, demostró ser efectivo en la medida que eliminó por completo cualquier señal perteneciente a los muones, y permitió mirar con mayor claridad los eventos de HSCPs en los bunch crossings superiores a 0. La errónea asignación de bunch crossing es más notable en las capas de la zona del barril (donde el crecimiento es gradual a medida que las capas están más alejadas del origen), que en las capas laterales. Esto se debe a que el número de capas en cada una de las regiones laterales es menor que el número de capas en la región central.

De esta manera, la identificación de HSCPs a través de la técnica del tiempo de vuelo (ToF), resulta ser completamente posible, efectiva y sin ambigüedades. Si ésta clase de partículas existe dentro de la escala de energías estudiada, podrán ser descubiertas por experimentos como CMS.

¹TAREM, S et al. Op.cit.,p.1-18.

BIBLIOGRAFIA

BRESSLER, S. R–Hadron and long lived particles searches at the LHC. arXiv:0710.2111v3 [hep-ex] (Oct. 2007); p. 1-4.

BRUN, R et al. ROOT Users Guide 5.2. 2008. 469p.

CARDONA, Simon. Estudio de señales SUSY en canales de dimuones utilizando el simulador pythia. Santafé de Bogotá, 2007, 70p. Trabajo de grado (Físico): Universidad de los Andes. Departamento de Física.

CARRILLO, Camilo. Search for Heavy Stable Charged Particles in the CMS Experiment using the RPC detectors. Santafé de Bogotá, 2008, 36p. Propuesta tesis (Doctor of Philosophy): Universidad de los Andes. Departamento de Física.

CMS Collaboration. CMS Physics Technical Design Report: Detector Performance and Software. D. Acosta, 2006. v1, p. 92-140. ISBN 92-9083-268-1.

CMS Collaboration. CMS Physics Technical Design Report: The Muon Project. D.Acosta, 1997. v1, p. 249-309.

European Organization for Nuclear Research. The Compact Muon Solenoid Experiment. <http://cms.web.cern.ch/cms/Detector/index.html>. Citado en Julio de 2009.

FAIRBAIRN, M. et al. Stable Massive Particles at Colliders. En: Physics Reports. arXiv:hep-ph/0611040v2 (dic. 2006); p. 1-100.

GIAGU, S. Search for long-lived particles in ATLAS and CMS. En: Cern Document Server. ATL-PHYS-PROC-2008-029 (Oct. 2008); p. 1-4.

JACKSON, J.D. Classical Electrodynamics. 2nd Ed. New York: John Wiley & Sons, 1975.

LEO, R. Techniques for Nuclear and Particles Physics Experiments. 2nd Ed. New York: Springer–Verlag, 1994. 378p. ISBN 0-387-57280-5.

NUNNEMANN, T. et al. A Search for Charged Massive Stable Particles. En: Proceedings of Science. arXiv:hep-ex/0602039v1 (feb. 2006); p. 1-4.

RAGUSA, Francesco. An Introduction to Charged Particles Tracking. En: Istituto Nazionale di Fisica Nucleare [en línea]. Disponible en: <http://www.le.infn.it/lhcschool/talks/Ragusa.pdf>

SJOSTRAND, T; MRENNNA, S y SKANDS, P. PYTHIA 6.4: Physics and Manual. En: FERMILAB-PUB-06-052-CD-T. arXiv:hep-ph/0603175 (Mar. 2006); 481p.

TAREM, S et al. Trigger and Reconstruction for heavy long-lived charged particles with the ATLAS detector. En: ATLAS NOTE. ATL-SN-ATLAS-2008-071 (jun. 2008); p. 1-18.

WHINGAM, Matthew. Commissioning of the CMS tracker and preparing for early physics at the LHC, Londres, 2008, 168p. Tesis (Doctor of Philosophy): Imperial College London. Department of Physics.

ANEXOS

Anexo A. Programa para la producción de s-taus ($\tilde{\tau}$)

Una vez instalado ROOT y copiada la librería de PYTHIA dentro de sus archivos, se procede a modificar el archivo *pythiaExample.C* ubicado en el directorio macros. Aquí se activan los diferentes parámetros y procesos que se desean estudiar (...ver sección 4.2...).

```
//-----  
//  
// File: pythiaExample.C  
//  
// To make an event sample (of size 100) do  
//  
// shell> root  
// root [0] .L pythiaExample.C  
// root [1] makeEventSample(1000)  
//  
// Modified: Jul-2009, Diego Mauricio Gomez  
//-----  
  
//-----PROGRAMA DE SIMULACION PARA LA PRODUCCION DE STAU-----  
//-----CON EL MODELO MSSM-----  
  
#ifndef __CINT__  
#include "TApplication.h"  
#include "TPythia6.h"  
#include "TMCParticle.h"  
#include "TFile.h"  
#include "TError.h"  
#include "TTree.h"  
#include "TClonesArray.h"  
#include "TH1.h"  
#include "TF1.h"  
#include "TStyle.h"  
#include "TLatex.h"  
#include "TCanvas.h"  
#include "Riostream.h"  
#include <cstdlib>  
#include "TObjArray.h"  
#include "TROOT.h"  
#include "TPrint.h"  
using namespace std;  
#endif  
  
#define FILENAME "stau.root"  
#define TREENAME "tree"  
#define BRANCHNAME "bparticles"  
  
// This function just load the needed libraries if  
// we're executing from an interactive session.  
void loadLibraries()  
{  
#ifdef __CINT__  
// Load the Event Generator abstraction library, Pythia 6  
// library, and the Pythia 6 interface library.  
gSystem->Load("libEG");  
gSystem->Load("libPythia6"); //change to your setup  
gSystem->Load("libEGPythia6");  
#endif  
}  
  
// nEvents is how many events we want.  
int makeEventSample(Int_t nEvents)
```

```

{
  // Load needed libraries
  loadLibraries();

  // Create an instance of the Pythia event generator ...
  TPythia6* Pythia = new TPythia6;

  //pythia switches

  Pythia.SetMSEL(0);           //set subprocesses by hand
  Pythia.SetMSUB(207,1);
  Pythia.SetMSUB(208,1);
  Pythia.SetMSUB(209,1);
  Pythia.SetMSUB(211,1);
  Pythia.SetMSUB(212,1);

  Pythia.SetMSTP(61, 1);      //ISR "on"
  Pythia.SetMSTP(71, 1);      //FSR "on"
  Pythia.SetMSTP(81, 1);      //multiple interactions "on"
  Pythia.SetMSTP(111, 0);     //fragmentation "on"

  /// Set SUSY parameters in SUGRA scenario

  Pythia.SetIMSS(1,1); //A general MSSM simulation, parameters set by RMSS
  Pythia.SetIMSS(3,1); //M3 is the gluino pole mass
  Pythia.SetIMSS(9,1); //masses of s-quarks fixed by RMSS(9) and RMSS(22)
  Pythia.SetIMSS(11,0); // -X1 is the LSP
  Pythia.SetRMSS(1,99.38); //M1 gaugino mass
  Pythia.SetRMSS(2,192.23); //M2 gaugino mass
  Pythia.SetRMSS(3,612.34); //M3 gluino mass parameter
  Pythia.SetRMSS(4,339.01); //higgsino mass parameter
  Pythia.SetRMSS(5,10.00); //tanbeta
  Pythia.SetRMSS(6,196.45); //Left s-lepton mass
  Pythia.SetRMSS(7,136.16); //Right s-lepton mass
  Pythia.SetRMSS(8,538.58); //Left s-quark mass
  Pythia.SetRMSS(9,519.26); //Right s-quark mass(-dR)
  Pythia.SetRMSS(10,496.24); //Left s-quark mass for third generation
  Pythia.SetRMSS(11,516.66); //Right sbottom mass
  Pythia.SetRMSS(12,429.42); //Right stop mass
  Pythia.SetRMSS(13,200.0); //Left s-tau mass
  Pythia.SetRMSS(14,100.0); //Right s-tau mass
  Pythia.SetRMSS(15,-684.58); //Bottom trilinear coupling Ab
  Pythia.SetRMSS(16,-465.08); //Top trilinear coupling At
  Pythia.SetRMSS(17,-156.62); //Tau trilinear coupling AT
  Pythia.SetRMSS(19,382.08); //Pseudoscalar Higgs parameter
  Pythia.SetRMSS(22,521.39); //Right s-quark mass (-uR)

  // ... and initialise it to run p+p at sqrt(14000) GeV in CMS
  Pythia.Initialize("cms", "p", "p", 14000);

  Pythia.Pystat(2);

  // Open an output file
  TFile* file = TFile::Open(FILENAME, "RECREATE");
  if (!file || !file->IsOpen()) {
    Error("makeEventSample", "Couldn;t open file %s", FILENAME);
    return 1;
  }

  // Make a tree in that file ...
  TTree* tree = new TTree(TREENAME, "Pythia 6 tree");

  // ... and register a the cache of pythia on a branch
  // (It's a TClonesArray of TMCParticle objects. )
  TClonesArray* particles = (TClonesArray*)Pythia->GetListOfParticles();
  tree->Branch(BRANCHNAME, &particles);

  // Now we make some events
  for (Int_t i = 0; i < nEvents; i++) {

```

```

// Show how far we got every 100'th event.
if (i % 100 == 0)
    cout << "Event # " << i << endl;

// Make one event.
Pythia->GenerateEvent();

//Show information for few events
if (i < 3)
    Pythia->Pylist(1);

// Now we're ready to fill the tree, and the event is over.
tree->Fill();
}

// Show tree structure
tree->Print();

//Pythia.Pystat(1);

// and now we flush and close the file
file->Write();
file->Close();

return 0;
}

```

Anexo B. Movimiento de una partícula cargada en un campo magnético.

En un campo magnético el movimiento de una partícula cargada es determinado por la fuerza de Lorentz.

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e\vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

Donde v es la velocidad de la partícula y B el campo magnético. En este caso tomamos la energía como una constante en el transcurso del tiempo $\frac{dE}{dt} = 0$, por lo que el módulo de la velocidad es constante y también lo es γ . La ecuación (1) puede escribirse de la forma siguiente.

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{v} \times \vec{\omega} \quad (2)$$

en donde

$$\vec{\omega} = \frac{e\vec{B}}{\gamma m} \quad (3)$$

es la frecuencia de giro o de precesión. El movimiento descrito por 2 es un movimiento circular perpendicular a \vec{B} junto con una traslación uniforme paralela a \vec{B}^2 . En el interior del solenoide superconductor $\vec{B} = B\hat{k}$, de manera que.

$$\ddot{x} = \omega\dot{y} \quad (4)$$

$$\ddot{y} = -\omega\dot{x} \quad (5)$$

$$\ddot{z} = 0 \quad (6)$$

Entonces las ecuaciones de movimiento en coordenadas cartesianas son.

$$\frac{d^3x}{dt^3} + \omega^2 \frac{dx}{dt} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{d^3y}{dt^3} + \omega^2 \frac{dy}{dt} = 0 \quad (8)$$

²JACKSON, J.D. Classical Electrodynamics. 2nd Ed. New York: John Wiley & Sons, 1975.

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = 0 \quad (9)$$

Resolviendo el conjunto de ecuaciones diferenciales para x , y y z obtenemos.

$$x(t) = x_0 + \frac{P_{0y}}{eB}(1 - \cos \omega t) + \frac{P_{0x}}{eB} \sin \omega t \quad (10)$$

$$y(t) = y_0 - \frac{P_{0x}}{eB}(1 - \cos \omega t) + \frac{P_{0y}}{eB} \sin \omega t \quad (11)$$

$$z(t) = z_0 + \frac{P_{0z}}{eB}(\omega t) \quad (12)$$

En el exterior del solenoide $\vec{B} = -B\hat{k}$, y las ecuaciones que describen la trayectoria serian.

$$x(t) = x_0 - \frac{P_{0y}}{eB}(1 - \cos \omega t) + \frac{P_{0x}}{eB} \sin \omega t \quad (13)$$

$$y(t) = y_0 + \frac{P_{0x}}{eB}(1 - \cos \omega t) + \frac{P_{0y}}{eB} \sin \omega t \quad (14)$$

$$z(t) = z_0 + \frac{P_{0z}}{eB}(\omega t) \quad (15)$$

En el programa se toma la posición inicial al interior del solenoide como $x_0 = 0$, $y_0 = 0$, y $z_0 = 0$; pero las posiciones iniciales al exterior del solenoide simplemente son los valores finales del primer recorrido. La trayectoria es una hélice de radio R que depende de la inducción magnética B y del impetu transversal de la partícula p_T ³.

$$R = \frac{p_T}{eB}, R(m) = \frac{p_T(\text{GeV})}{0,3B(T)} \quad (16)$$

$$R^2 = (x - x_0 \pm \frac{P_{0y}}{eB})^2 + (y - y_0 \mp \frac{P_{0x}}{eB})^2 \quad (17)$$

³RAGUSA, Francesco. An Introduction to Charged Particles Tracking. En: Istituto Nazionale di Fisica Nucleare [en línea]. Disponible en: <http://www.le.infn.it/lhcschool/talks/Ragusa.pdf>

Esta forma resulta adecuada para calcular el momento de la partícula. En el caso de este trabajo servirá para determinar los radios de curvatura y lograr comprobar si el programa de computador desarrolla de manera eficiente las trayectorias.

Anexo C. Programa para la propagación de HSCPs.

Se ha creado dos programas bajo el lenguaje C en los archivos *HSCP.h* y *HSCPexample.C*, que pueden ser ejecutados desde ROOT. En el primero se incluye a través de una clase y varias funciones todo el proceso para obtener los retrasos en el tiempo de vuelo, cuyos datos son almacenados en un tree llamado ToF.root. En el segundo archivo se activan estas funciones, se toma cada conjunto de valores iniciales de momento y energía para realizar todo el proceso, y por último se clasifican los tiempos del tree dentro del bunch crossing correspondiente. Los histogramas pueden ser graficados utilizando las herramientas de ROOT y los resultados de los programas mencionados. Por su extensión los archivos se adjuntan por separado.

```

//*****//
// File:   HSCP.h           //
// Created: JUL-2009 by D. Gomez //
// Comments: A tree is created with times of every layer in //
//           his branches //
// Purpose: Propagate heavy stable charged particles through //
//           magnetic fields of CMS detector. //
//*****//

#ifndef HSCP_H
#define HSCP_H

#include<stdio.h>
#include<math.h>
#include<stdlib.h>
#include<TROOT.h>
#include<TFile.h>
#include "TTree.h"
#include "TBrowser.h"

#define M_PI 3.14159265358979323846 /*pi*/
#define C 299792458.0
#define B1 4
#define B2 2
#define K 0.3
#define DT 0.000000000001
#define PNTS 100000
#define NS 1000000000
#define CM 100

TFile f("ToF.root","recreate");
TTree t1("t1","Tree with simple variables");

class HSCP{

public:

//*****Variables*****
double Pox,Poy,Poz,Eo,Po,w1,w2;
double theta,pseurap,beta;
double x1, y1, z1, r1, px1, py1, pz1;
double x2, y2, z2, r2, px2, py2, pz2;
int q,n;
//-----Tiempos en las capas-----
double t11, t12, t13, t14, t15, t16;
double t1r1, t1r2, t1r3, t1l1, t1l2, t1l3;
//*****

// Constructor
HSCP(double Pox=0.0, double Poy=0.0, double Poz=0.0, double Eo=0.0,
double Po=0.0, double w1=0.0, double w2=0.0, double theta=0.0,
```

```

double pseurap=0.0, double beta=0.0, int q=0, int n=0);
// Destructor
~HSCP();

//Funciones miembro
int  charge  ();
int  event   ();
double momx  ();
double momy  ();
double momz  ();
double energy ();
double frec1 (double Eo);
double frec2 (double Eo);
double momtot (double Pox, double Poy, double Poz);
double angulo1 (double Poz, double Po);
double angulo2 (double theta);
double veloc  (double Po, double Eo);
double posx1  (double t);
double posy1  (double t);
double posz1  (double t);
double Px1    (double t);
double Py1    (double t);
double Pz1    ();
double posx2  (double Xo, double Pox2, double Poy2, double t);
double posy2  (double Yo, double Pox2, double Poy2, double t);
double posz2  (double Zo, double Poz2, double t);
double Px2    (double Pox2, double Poy2, double t);
double Py2    (double Pox2, double Poy2, double t);
double Pz2    (double Poz2);

void SetCharge    (const int &);
void SetEventNumber(int &);
void SetPx        (double &);
void SetPy        (double &);
void SetPz        (double &);
void SetEnergy    (double &);
void SetInit      ();
void SetPrintStats (int i);
void SetCredits   ();
void SetFillTree  ();
void SetWriteTree ();
void SetOpenTree  ();
};

HSCP::HSCP(double Pox,double Poy,double Poz,double Eo,double Po,
double w1, double w2,double theta, double pseurap, double beta,
int q, int n)

{printf("Se crea la clase HSCP\n");}

HSCP::~HSCP(void)
{printf("Se destruye la clase HSCP\n");}

//*****
// Variables iniciales
int HSCP::charge(){return q;}
int HSCP::event(){return n;}
double HSCP::momx(){return Pox;}
double HSCP::momy(){return Poy;}
double HSCP::momz(){return Poz;}
double HSCP::energy(){return Eo;}

void HSCP::SetCharge(const int &carga){q = carga;}
void HSCP::SetEventNumber(int &evento){n = evento;}
void HSCP::SetPx(double &momex){Pox = momex;}
void HSCP::SetPy(double &momey){Poy = momey;}
void HSCP::SetPz(double &momez){Poz = momez;}
void HSCP::SetEnergy(double &energia){Eo = energia;}

```

```

//*****

//*****
// Funciones de valores invariantes
double HSCP::frec1(double Eo)
{return (q*K*B1*C/Eo);}

double HSCP::frec2(double Eo)
{return (q*K*B2*C/Eo);}

double HSCP::momtot(double Pox, double Poy, double Poz)
{return (sqrt(pow(Pox,2)+pow(Poy,2)+pow(Poz,2)));}

double HSCP::angulo1(double Poz, double Po)
{return acos(Poz/Po);}

double HSCP::angulo2(double theta)
{return -log(tan(theta/2));}

double HSCP::veloc(double Po, double Eo)
{return Po/Eo;}
//*****

//*****
//Funciones para el calculo de posiciones y momentos
//en el campo magnetico interior al solenoide (4Teslas)
double HSCP::posx1(double t)
{return (-Poy/(q*B1*K))*(cos(w1*t)-1)+(Pox/(q*B1*K))*sin(w1*t);}

double HSCP::posy1(double t)
{return (Pox/(q*B1*K))*(cos(w1*t)-1)+(Poy/(q*B1*K))*sin(w1*t);}

double HSCP::posz1(double t)
{return (Poz/(q*B1*K))*w1*t;}

double HSCP::Px1(double t)
{return (Pox)*(cos(w1*t))+(Poy)*sin(w1*t);}

double HSCP::Py1(double t)
{return (Poy)*(cos(w1*t))+(-Pox)*sin(w1*t);}

double HSCP::Pz1()
{return Poz;}
//*****

//*****//
//Funciones para el calculo de posiciones y momentos //
//en el campo magnetico exterior al solenoide (2Teslas)

double HSCP::posx2 (double Xo, double Pox2, double Poy2, double t)
{return Xo+(Poy2/(q*B2*K))*(cos(w2*t)-1)+(Pox2/(q*B2*K))*sin(w2*t);}

double HSCP::posy2 (double Yo, double Pox2, double Poy2, double t)
{return Yo+(-Pox2/(q*B2*K))*(cos(w2*t)-1)+(Poy2/(q*B2*K))*sin(w2*t);}

double HSCP::posz2 (double Zo, double Poz2, double t)
{return Zo+(Poz2/(q*B2*K))*w2*t;}

double HSCP::Px2 (double Pox2, double Poy2, double t)
{return (Pox2)*(cos(w2*t))+(-Poy2)*sin(w2*t);}

double HSCP::Py2 (double Pox2, double Poy2, double t)
{return (Poy2)*(cos(w2*t))+(Pox2)*sin(w2*t);}

double HSCP::Pz2 (double Poz2)
{return Poz2;}
//*****

void HSCP::SetInit(){

```

```

//long idum=-384501;
double tt, ttf, tt2, tt1, ttmu, tto;
double Poxx2, Poyy2, Pozz2, XXo, YYo, ZZo;
w1=frec1(Eo);
w2=frec2(Eo);
Po=montot(Pox,Poy,Poz);
theta=angulo1(Poz,Po);
pseurap=angulo2(theta);
beta=veloc(Po,Eo);
//-----Inicializadores-----
-
int i=0;
int j=0;
tt = 0.0;
tt2 = 0.0;
tto = 0;//1.06*ran2(&idum);
tl1=-1, tl2=-1, tl3=-1, tl4=-1, tl5=-1, tl6=-1;
tlr1=-1, tlr2=-1, tlr3=-1, tll1=-1, tll2=-1, tll3=-1;
//-----Loop para calcular la posicion de la particula-----
//-----en cada intervalo de tiempo-----
if((sqrt(pow(Pox,2)+pow(Poy,2)))>=20){
if(beta<=0.7){
for(i; i<PNTS; i++){

x1=posx1(tt);
y1=posy1(tt);
z1=posz1(tt);
px1=Px1(tt);
py1=Py1(tt);
pz1=Pz1();
r1 = sqrt(pow(x1,2)+pow(y1,2));

j=i;
tt=tt+DT;

//---Limites del solenoide-----
//---coordenada radial-----
if(r1<3.3760 && r1>3.3740) break;

//----coordenada polar-----
if(z1<10.8 && z1>10.7) break;

if(z1<-10.7 && z1>-10.8) break;

}

tt1 = tt-DT;
Poxx2=px1;
Poyy2=py1;
Pozz2=pz1;
XXo=x1;
YYo=y1;
ZZo=z1;

//---inicializadores en cada
capa-----
int l1=0,l2=0,l3=0,l4=0,l5=0,l6=0;
int elp1=0,elp2=0,elp3=0,eln1=0,eln2=0,eln3=0;

for(i=j; i<PNTS; i++){

x2=posx2(XXo, Poxx2, Poyy2, tt2);
y2=posy2(YYo, Poxx2, Poyy2, tt2);
z2=posz2(ZZo, Pozz2, tt2);
px2=Px2(Poxx2, Poyy2, tt2);
py2=Py2(Poxx2, Poyy2, tt2);
pz2=Pz2(Pozz2);

```

```

j=i;
ttf=tt1+tt2;

tt2=tt2+DT;

r2 = sqrt(pow(x2,2)+pow(y2,2));

//-----Limites capas de
RPCs-----

//-----Zona del
barril-----

if(z2<6.6100 && z2>-6.6100){
//-----layer 1 -----
if(r2>4.0200 && r2<4.021){

l1=l1+1;
if(l1==1){

ttmu=((sqrt(pow(r2,2)+pow(z2,2)))/C)*NS;//tiempo del muon a la primera capa
t11=(ttf*NS+tto)-ttmu;
}
}
//-----layer 2 -----
if(r2>4.3900 && r2<4.4000 ){
l2=l2+1;
if(l2==1){

ttmu=((sqrt(pow(r2,2)+pow(z2,2)))/C)*NS;//tiempo del muon a la segunda capa
t12=(ttf*NS+tto)-ttmu;
}
}
//-----layer 3 -----
if(r2>4.9050 && r2<4.906 ){
l3=l3+1;
if(l3==1){

ttmu=((sqrt(pow(r2,2)+pow(z2,2)))/C)*NS;//tiempo del muon a la tercera capa
t13=(ttf*NS+tto)-ttmu;
}
}
//-----layer 4 -----
if(r2>5.0300 && r2<5.031 ){
l4=l4+1;
if(l4==1){

ttmu=((sqrt(pow(r2,2)+pow(z2,2)))/C)*NS;//tiempo del muon a la cuarta capa
t14=(ttf*NS+tto)-ttmu;
}
}
//-----layer 5
-----
if(r2>5.9750 && r2<5.976 ){
l5=l5+1;
if(l5==1){

ttmu=((sqrt(pow(r2,2)+pow(z2,2)))/C)*NS;//tiempo del muon a la quinta capa
t15=(ttf*NS+tto)-ttmu;
}
}
//-----layer 6
-----
if(r2>7.000 && r2<7.001 ){
l6=l6+1;
if(l6==1){

ttmu=((sqrt(pow(r2,2)+pow(z2,2)))/C)*NS;//tiempo del muon a la sexta capa
t16=(ttf*NS+tto)-ttmu;
}
}

```

```

    }
  }
}

//----- Zona de las capas
exteriores-----

//----- endlayer 1 -----
if(r2>2.7000 && r2<6.9550){
  if(z2<7.2100 && z2>7.2090){
    elp1=elp1+1;
    if(elp1==1){

      ttmu=((sqrt(pow(r2,2)+pow(z2,2)))/C)*NS;
      tlr1=(ttf*NS+tto)-ttmu;
    }
  }

  if(z2>-7.2100 && z2<-7.2090){
    eln1=eln1+1;
    if(eln1==1){

      ttmu=((sqrt(pow(r2,2)+pow(z2,2)))/C)*NS;
      tll1=(ttf*NS+tto)-ttmu;
    }
  }
}
//----- endlayer 2 -----
if(r2>3.5800 && r2<6.9550 ){
  if(z2<8.4400 && z2>8.4390){
    elp2=elp2+1;
    if(elp2==1){

      ttmu=((sqrt(pow(r2,2)+pow(z2,2)))/C)*NS;
      tlr2=(ttf*NS+tto)-ttmu;
    }
  }

  if(z2>-8.4400 && z2<-8.4390){
    eln2=eln2+1;
    if(eln2==1){

      ttmu=((sqrt(pow(r2,2)+pow(z2,2)))/C)*NS;
      tll2=(ttf*NS+tto)-ttmu;
    }
  }
}
//----- endlayer 3 -----
if(z2<9.6700 && z2>9.6690){
  elp3=elp3+1;
  if(elp3==1){

    ttmu=((sqrt(pow(r2,2)+pow(z2,2)))/C)*NS;
    tlr3=(ttf*NS+tto)-ttmu;
  }
}

if(z2>-9.6700 && z2<-9.6690){
  eln3=eln3+1;
  if(eln3==1){

    ttmu=((sqrt(pow(r2,2)+pow(z2,2)))/C)*NS;
    tll3=(ttf*NS+tto)-ttmu;
  }
}
}
//-----Limites del
detector-----
//-----coordenada radial-----
if(r2<7.381 && r2>7.379){break;}

```



```

*****\n");
}

else if(i==2){
printf("Se crea el archivo estadistica.dat\n");
fprintf(pf1,"*****\n");
*****\n");
fprintf(pf1,"*
PARTICULE #%6d
*\n",n);
fprintf(pf1,"*****\n");
*****\n");
fprintf(pf1,"*
*
Time of Flight
*\n");
fprintf(pf1,"*
*****\n");
fprintf(pf1,"* Energy = % 11.3lf * Barrel-caps *
End-caps *\n",Eo);
fprintf(pf1,"* Momentum = % 11.3lf
*****\n",Po);
fprintf(pf1,"* Beta = % 11.3lf *1* % 10.4lf * Right *
Left *\n",beta,t11);
fprintf(pf1,"* Theta = % 11.3lf *2* % 10.4lf
*****\n", (180/M_PI)*theta,t12);
fprintf(pf1,"* Pseudo- *3* % 10.4lf *1* % 10.4lf * %
10.4lf *\n",t13,tlr1,t111);
fprintf(pf1,"* rapidity = % 11.3lf *4* % 10.4lf *2* % 10.4lf * %
10.4lf *\n",pseudrap,t14,tlr2,t112);
fprintf(pf1,"* *5* % 10.4lf *3* % 10.4lf * %
10.4lf *\n",t15,tlr3,t113);
fprintf(pf1,"* *6* % 10.4lf
*****\n",t16);
fprintf(pf1,"*****\n");
*****\n");
}

else if(i==3){
printf("Se crea el archivo timebarrellayers.dat: Cada columna
corresponde\n");
printf("a los tiempos en cada capa comenzando por la primera hasta la
sexta.\n");
fprintf(pf2,"%lf %lf %lf %lf %lf %lf\n",t11,t12,t13,t14,t15,t16);

printf("Se crea el archivo timeendlayers.dat: Las tres primeras columnas
corresponden\n");
printf("a los tiempos de las capas derechas y las tres ultimas a las
izquierdas.\n");
fprintf(pf3,"%lf %lf %lf %lf %lf %lf\n",tlr1,tlr2,tlr3,t111,t112,t113);
}

else printf("Error: Numero de opcion no valida\n");
}

void HSCP::SetCredits(){

printf("*****\n");
printf("*****\n");
printf("*** Program: Bunch Crossing of Heavy Stable **\n");
printf("*** Charged Particles (bxHSCPs) **\n");
printf("*** Files: Class HSCP.h, HSCPexample.C **\n");
printf("*** Created: JUL-2009 by D. Gomez **\n");

printf("*** Purpose: Propagate heavy stable charged particles **\n");
printf("*** through magnetics fields of CMS detector.**\n");
printf("*** It measures times of flight and delivery **\n");
printf("*** distributions of bunch crossing. **\n");
printf("*****\n");
printf("*****\n");
}

```

```

#endif

//***** //
// File:      HSCPexample.C           //
// Created:   JUL-2009 by D. Gomez    //
// Purpose:   Propagate heavy stable charged particles through //
//            magnetics fields of CMS detector.           //
// Comments:  A tree called "ToF.root" is created with times //
//            of each RPCs layer in its branches.         //
//            Two files will be generated with the       //
//            bunch crossing distributions "bxbarrel.root" //
//            for the barrel zone and "bxendcaps.root" for //
//            the endcaps.                               //
//            This example can be run as follow:         //
//            -You must locate the file with your input data //
//            and replace it by "datosentrada.txt"       //
//            -Then set-on the switches to start the process //
//            -In a ROOT sesion you can do:             //
//            Root > .x HSCPexample.C                   //
//            *****//

#include "TROOT.h"
#include "TFile.h"
#include "TTree.h"
#include "TBrowser.h"
#include "TH2.h"
#include "TRandom.h"
#include "HSCP.h"

void InitToF(){
  //gROOT->Reset();
  FILE *pfe;

  //FILE *pf1;
  //FILE *pf2;
  //FILE *pf3;

  Int_t n=26531;
  Double_t px,py,pz,E;

  HSCP hscp; //Se instancia un objeto de la clase

  pfe=fopen("datosentrada.txt","r"); //Se lee un archivo con los valores iniciales

  //pf1=fopen("estadistica.dat","w"); //Se escribe un archivo
  //pf2=fopen("timebarrellayers.dat","w"); //Se escribe un archivo
  //pf3=fopen("timeendlayers.dat","w"); //Se escribe un archivo

  hscp.SetCredits();
  hscp.SetOpenTree(); // Se crea el arbol

  for(Int_t j=1; j<=n; j++){

    fscanf(pfe,"%lf %lf %lf %lf",&px,&py,&pz,&E);
    printf("Event #%6d\n",j);
    hscp.SetCharge(-1);
    hscp.SetEventNumber(j);
    hscp.SetPx(px);
    hscp.SetPy(py);
    hscp.SetPz(pz);
    hscp.SetEnergy(E);
    hscp.SetInit(); //Inicia la propagacion de HSCPs en CMS
    //hscp.SetPrintStats(1); //Imprime en pantalla toda
    //la informacion sobre cada particula
  }
}

```

```

    //hscp.SetPrintStats(2);//Imprime en el archivo "estadistica.dat"
        // toda la informacion sobre cada particula
    //hscp.SetPrintStats(3);//Imprime en los archivos toda la informacion
        //sobre los tiempos de cada particula
    hscp.SetFillTree(); // Se llena al arbol
}

hscp.SetWriteTree(); //Se escribe el arbol

//fclose(pf1);
//fclose(pf2);
//fclose(pf3);

fclose(pfe);
}

void BunchCrossing()
{
    //read the Tree generated by and fill two histograms
    //note that we use "new" to create the TFile and TTree objects !
    //because we want to keep these objects alive when we leave this function.

    TFile *f = new TFile("ToF.root");
    TTree *t1 = (TTree*)f->Get("t1");

    Double_t t11, t12, t13, t14, t15, t16;
    Double_t tlr1, tlr2, tlr3, tll1, tll2, tll3;
    Double_t bxt11, bxt12, bxt13, bxt14, bxt15, bxt16;
    Double_t bxtlr1, bxtlr2, bxtlr3, bxtll1, bxtll2, bxtll3;

    t1->SetBranchAddress("t11",&t11);
    t1->SetBranchAddress("t12",&t12);
    t1->SetBranchAddress("t13",&t13);
    t1->SetBranchAddress("t14",&t14);
    t1->SetBranchAddress("t15",&t15);
    t1->SetBranchAddress("t16",&t16);
    t1->SetBranchAddress("tlr1",&tlr1);
    t1->SetBranchAddress("tlr2",&tlr2);
    t1->SetBranchAddress("tlr3",&tlr3);
    t1->SetBranchAddress("tll1",&tll1);
    t1->SetBranchAddress("tll2",&tll2);
    t1->SetBranchAddress("tll3",&tll3);

    //create histograms
    TH1F *h1 = new TH1F("h1","bunch crossing capa 1 ",10,-4,5);
    TH1F *h2 = new TH1F("h2","bunch crossing capa 2 ",10,-4,5);
    TH1F *h3 = new TH1F("h3","bunch crossing capa 3 ",10,-4,5);
    TH1F *h4 = new TH1F("h4","bunch crossing capa 4 ",10,-4,5);
    TH1F *h5 = new TH1F("h5","bunch crossing capa 5 ",11,-5,5);
    TH1F *h6 = new TH1F("h6","bunch crossing capa 6 ",11,-5,5);

    TH1F *h7 = new TH1F("h1r","bunch crossing capa-derecha 1",11,-4.9,5);
    TH1F *h8 = new TH1F("h2r","bunch crossing capa-derecha 2",11,-5,5);
    TH1F *h9 = new TH1F("h3r","bunch crossing capa-derecha 3",11,-5,5);
    TH1F *h10 = new TH1F("h1l","bunch crossing capa-izquierda 1",11,-5,5);
    TH1F *h11 = new TH1F("h2l","bunch crossing capa-izquierda 2",11,-5,5);
    TH1F *h12 = new TH1F("h3l","bunch crossing capa-izquierda 3",11,-5,5);

    //read all entries and fill the histograms
    //Se clasifican los bunch crossing en la zona de barril
    Int_t nentries = (Int_t)t1->GetEntries();
    for (Int_t i=0;i<nentries;i++) {
        t1->GetEntry(i);

        printf("%lf\n",t11);
        if(t11<25.0 && t11>=0.0){
            bxt11=0;
            printf("bxt11 = %lf \n ",bxt11);
        }
    }
}

```

```

else if(t11<50.0 && t11>=25.0){
    bxt11=1;
    printf("bxt11 = %lf \n ",bxt11);
}
else if(t11<75.0 && t11>=50.0){
    bxt11=2;
    printf("bxt11 = %lf \n ",bxt11);
}
else if(t11<100.0 && t11>=75.0){
    bxt11=3;
    printf("bxt11 = %lf \n ",bxt11);
}
else continue;

h1->Fill(bxt11);
}

Int_t nentries = (Int_t)t1->GetEntries();
for (Int_t i=0;i<nentries;i++) {
    t1->GetEntry(i);

    printf("%lf\n",t12);
if(t12<25.0 && t12>=0.0){
    bxt12=0;
    printf("bxt12 = %lf \n ",bxt12);
}
else if(t12<50.0 && t12>=25.0){
    bxt12=1;
    printf("bxt12 = %lf \n ",bxt12);
}
else if(t12<75.0 && t12>=50.0){
    bxt12=2;
    printf("bxt12 = %lf \n ",bxt12);
}
else if(t12<100.0 && t12>=75.0){
    bxt12=3;
    printf("bxt12 = %lf \n ",bxt12);
}
else continue;

h2->Fill(bxt12);
}

Int_t nentries = (Int_t)t1->GetEntries();
for (Int_t i=0;i<nentries;i++) {
    t1->GetEntry(i);

    printf("%lf\n",t13);
if(t13<25.0 && t13>=0.0){
    bxt13=0;
    printf("bxt13 = %lf \n ",bxt13);
}
else if(t13<50.0 && t13>=25.0){
    bxt13=1;
    printf("bxt13 = %lf \n ",bxt13);
}
else if(t13<75.0 && t13>=50.0){
    bxt13=2;
    printf("bxt13 = %lf \n ",bxt13);
}
else if(t13<100.0 && t13>=75.0){
    bxt13=3;
    printf("bxt13 = %lf \n ",bxt13);
}
else continue;

h3->Fill(bxt13);
}

```

```

Int_t nentries = (Int_t)t1->GetEntries();
for (Int_t i=0;i<nentries;i++) {
    t1->GetEntry(i);

    printf("%lf\n",t14);
    if(t14<25.0 && t14>=0.0){
        bxt14=0;
        printf("bxt14 = %lf \n ",bxt14);
    }
    else if(t14<50.0 && t14>=25.0){
        bxt14=1;
        printf("bxt14 = %lf \n ",bxt14);
    }
    else if(t14<75.0 && t14>=50.0){
        bxt14=2;
        printf("bxt14 = %lf \n ",bxt14);
    }
    else if(t14<100.0 && t14>=75.0){
        bxt14=3;
        printf("bxt14 = %lf \n ",bxt14);
    }
    else continue;
    h4->Fill(bxt14);
}

Int_t nentries = (Int_t)t1->GetEntries();
for (Int_t i=0;i<nentries;i++) {
    t1->GetEntry(i);

    printf("%lf\n",t15);
    if(t15<25.0 && t15>=0.0){
        bxt15=0;
        printf("bxt15 = %lf \n ",bxt15);
    }
    else if(t15<50.0 && t15>=25.0){
        bxt15=1;
        printf("bxt15 = %lf \n ",bxt15);
    }
    else if(t15<75.0 && t15>=50.0){
        bxt15=2;
        printf("bxt15 = %lf \n ",bxt15);
    }
    else if(t15<100.0 && t15>=75.0){
        bxt15=3;
        printf("bxt15 = %lf \n ",bxt15);
    }
    else continue;
    h5->Fill(bxt15);
}

Int_t nentries = (Int_t)t1->GetEntries();
for (Int_t i=0;i<nentries;i++) {
    t1->GetEntry(i);

    printf("%lf\n",t16);
    if(t16<25.0 && t16>=0.0){
        bxt16=0;
        printf("bxt16 = %lf \n ",bxt16);
    }
    else if(t16<50.0 && t16>=25.0){
        bxt16=1;
        printf("bxt16 = %lf \n ",bxt16);
    }
    else if(t16<75.0 && t16>=50.0){
        bxt16=2;

```

```

    printf("bxtl6 = %lf \n ",bxtl6);
}
else if(tl6<100.0 && tl6>=75.0){
    bxtl6=3;
    printf("bxtl6 = %lf \n ",bxtl6);
}
else continue;

h6->Fill(bxtl6);
}

//Se clasifican los bunch crossing en las endcaps
Int_t nentries = (Int_t)t1->GetEntries();
for (Int_t i=0;i<nentries;i++) {
    t1->GetEntry(i);

    printf("%lf\n",t1r1);
if(t1r1<25.0 && t1r1>=0.0){
    bxt1r1=0;
    printf("bxt1r1 = %lf \n ",bxt1r1);
}
else if(t1r1<50.0 && t1r1>=25.0){
    bxt1r1=1;
    printf("bxt1r1 = %lf \n ",bxt1r1);
}
else if(t1r1<75.0 && t1r1>=50.0){
    bxt1r1=2;
    printf("bxt1r1 = %lf \n ",bxt1r1);
}
else if(t1r1<100.0 && t1r1>=75.0){
    bxt1r1=3;
    printf("bxt1r1 = %lf \n ",bxt1r1);
}
else continue;

h7->Fill(bxt1r1);
}

Int_t nentries = (Int_t)t1->GetEntries();
for (Int_t i=0;i<nentries;i++) {
    t1->GetEntry(i);

    printf("%lf\n",t1r2);
if(t1r2<25.0 && t1r2>=0.0){
    bxt1r2=0;
    printf("bxt1r2 = %lf \n ",bxt1r2);
}
else if(t1r2<50.0 && t1r2>=25.0){
    bxt1r2=1;
    printf("bxt1r2 = %lf \n ",bxt1r2);
}
else if(t1r2<75.0 && t1r2>=50.0){
    bxt1r2=2;
    printf("bxt1r2 = %lf \n ",bxt1r2);
}
else if(t1r2<100.0 && t1r2>=75.0){
    bxt1r2=3;
    printf("bxt1r2 = %lf \n ",bxt1r2);
}
else continue;

h8->Fill(bxt1r2);
}

Int_t nentries = (Int_t)t1->GetEntries();
for (Int_t i=0;i<nentries;i++) {
    t1->GetEntry(i);

    printf("%lf\n",t1r3);

```

```

if(tlr3<25.0 && tlr3>=0.0){
    bxtlr3=0;
    printf("bxtlr3 = %lf \n ",bxtlr3);
}
else if(tlr3<50.0 && tlr3>=25.0){
    bxtlr3=1;
    printf("bxtlr3 = %lf \n ",bxtlr3);
}
else if(tlr3<75.0 && tlr3>=50.0){
    bxtlr3=2;
    printf("bxtlr3 = %lf \n ",bxtlr3);
}
else if(tlr3<100.0 && tlr3>=75.0){
    bxtlr3=3;
    printf("bxtlr3 = %lf \n ",bxtlr3);
}
else continue;

h9->Fill(bxtlr3);

}

Int_t nentries = (Int_t)t1->GetEntries();
for (Int_t i=0;i<nentries;i++) {
    t1->GetEntry(i);

    printf("%lf\n",t111);
if(t111<25.0 && t111>=0.0){
    bxt111=0;
    printf("bxt111 = %lf \n ",bxt111);
}
else if(t111<50.0 && t111>=25.0){
    bxt111=1;
    printf("bxt111 = %lf \n ",bxt111);
}
else if(t111<75.0 && t111>=50.0){
    bxt111=2;
    printf("bxt111 = %lf \n ",bxt111);
}
else if(t111<100.0 && t111>=75.0){
    bxt111=3;
    printf("bxt111 = %lf \n ",bxt111);
}
else continue;

h10->Fill(bxt111);
}

Int_t nentries = (Int_t)t1->GetEntries();
for (Int_t i=0;i<nentries;i++) {
    t1->GetEntry(i);

    printf("%lf\n",t112);
if(t112<25.0 && t112>=0.0){
    bxt112=0;
    printf("bxt112 = %lf \n ",bxt112);
}
else if(t112<50.0 && t112>=25.0){
    bxt112=1;
    printf("bxt112 = %lf \n ",bxt112);
}
else if(t112<75.0 && t112>=50.0){
    bxt112=2;
    printf("bxt112 = %lf \n ",bxt112);
}
else if(t112<100.0 && t112>=75.0){
    bxt112=3;
    printf("bxt112 = %lf \n ",bxt112);
}
}

```

```

else continue;

h11->Fill(bxt112);
}

Int_t nentries = (Int_t)t1->GetEntries();
for (Int_t i=0;i<nentries;i++) {
    t1->GetEntry(i);

    printf("%lf\n",t113);
    if(t113<25.0 && t113>=0.0){
        bxt113=0;
        printf("bxt113 = %lf \n ",bxt113);
    }
    else if(t113<50.0 && t113>=25.0){
        bxt113=1;
        printf("bxt113 = %lf \n ",bxt113);
    }
    else if(t113<75.0 && t113>=50.0){
        bxt113=2;
        printf("bxt113 = %lf \n ",bxt113);
    }
    else if(t113<100.0 && t113>=75.0){
        bxt113=3;
        printf("bxt113 = %lf \n ",bxt113);
    }
    else continue;

h12->Fill(bxt113);

}

TFile *f2=new TFile("bxbarrel.root","RECREATE");

h1->Write();
h2->Write();
h3->Write();
h4->Write();
h5->Write();
h6->Write();

f2->Close();

TFile *f3=new TFile("bxendcaps.root","RECREATE");

h7->Write();
h8->Write();
h9->Write();
h10->Write();
h11->Write();
h12->Write();

f3->Close();
//we do not close the file. We want to keep the generated histograms
//we open a browser and the TreeViewer
//if (gROOT->IsBatch()) return;
//new TBrowser();
t1->StartViewer();
// in the browser, click on "ROOT Files", then on "ToF.root".
// you can click on the histogram icons in the right panel to draw them.
// in the TreeViewer, follow the instructions in the Help button.
}

void HSCPexample(){
    InitToF();
    BunchCrossing();
}

```