PRIMERA VALIDACIÓN DEL ALGORITMO DE AJUSTE GSF PARA LA RECONSTRUCCIÓN DE VÉRTICES PRIMARIOS PARA LOS DECAIMIENTOS $H \to ZZ \to 4e^-$ Y $H \to ZZ \to 4mu$ EN EL EXPERIMENTO DE CMS.

Por

NEIDA MIREY SANTACRUZ SARMIENTO

Tesis sometida en cumplimiento parcial de los requerimientos para el grado de

MAESTRÍA EN CIENCIAS

en

FÍSICA

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO
RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ

Diciembre, 2007

Aprobada por:

Angel Lopez, Ph.D Miembro, Comite Graduado	Fecha
Hector Mendez, Ph.D Miembro, Comite Graduado	Fecha
Juan Eduardo Ramirez, Ph.D Presidente, Comite Graduado	Fecha
Halley D. Sánchez, Ph.D Representante de Estudios Graduados	Fecha
Hector Jimenez, Ph.D Director del Departmento	Fecha

CERN-THESIS-2007-186

Abstract of Disertation Presented to the Graduate School
of the University of Puerto Rico in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of M.Sc.

FIRST VALIDATION OF THE GSF ALGORITHM FOR THE RECONSTRUCTION OF PRIMARY VERTEX FITTER FOR THE DECAYS $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^{-}$ Y $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4mu$ IN THE CMS EXPERIMENT.

By

NEIDA MIREY SANTACRUZ SARMIENTO

December 2007

Chair: Juan Eduardo Ramirez
Major Department: Physics

The pixel detector is the most internal detector of the tracking system on the CMS experiment at the LHC. This detector provides the most accurate measurements for a complete reconstruction of traces and vertices of charged particles. The fitting algorithms known as KVF, AVF, TKF and GSF for such a reconstruction have been developed, implemented and studied within the working framework of the CMS. At this moment, KVF, AVF and TKF algorithms have been already validated and adjusted to find the best performance for each one in order to select the optimum fit for primary vertices. In the followin research work, I offer the data from the first validation of the GSF algorithm for the $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^{-}$ and $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$ samples, and analyze the obtained results. This kind of validation is on the frontier of research in this field.

Resumen de Disertación Presentado a Escuela Graduada
de la Universidad de Puerto Rico como requisito parcial de los
Requerimientos para el grado de Maestría en Ciencias

PRIMERA VALIDACIÓN DEL ALGORITMO DE AJUSTE GSF PARA LA RECONSTRUCCIÓN DE VÉRTICES PRIMARIOS PARA LOS DECAIMIENTOS $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^{-}$ Y $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4mu$ EN EL EXPERIMENTO DE CMS.

Por

NEIDA MIREY SANTACRUZ SARMIENTO

Diciembre 2007

Consejero: Juan Eduardo Ramirez
Departamento: Física

El detector de pixeles es el detector más interno del sistema de seguimiento del experimento CMS del LHC. Este detector proporciona las medidas más exactas para una completa reconstrucción de trazas y vértices de partículas cargadas. Los algoritmos de ajuste KVF, AVF, TKF y GSF para dicha reconstrucción han sido desarrollados, implementados y estudiados en el marco de trabajo del CMS. Actualmente se han validado los algoritmos KVF, AVF y TKF para encontrar el mejor funcionamiento de cada uno de ellos y así seleccionar el mejor ajuste para vértices primarios. En el siguiente trabajo de investigación presento los datos obtenidos de la primera validación del algoritmo GSF para las muestras $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^{-}$ y $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$, y se analizan los resultados obtenidos. Este tipo de validación se encuentra en la frontera de las investigaciones en este campo.

Copyright © 2007

por

NEIDA MIREY SANTACRUZ SARMIENTO

Dedico con mucho amor el trabajo que hoy culmina con esta investigación a mi familia, especialmente a mi madre y mis hijos quienes creyeron, sacrificaron y me apoyaron durante todo este tiempo.

A la memoria de

mi Padre

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por haberme dado la oportunidad de ahondar en la ciencia y permitirme avanzar un peldaño más en la academia. Al grupo de Física de Altas energías del Recinto Universitario de Mayagüez P.R conformado por Ph.D Eduardo Rámirez, mi director, Ph.D Angel Lopez y Ph.D Hector Mendez, integrantes del comite Graduado, por sus invaluables aportes, paciencia, apoyo y el permitirme formar parte integral de grupo. A Francisco Yumiceva por su gran disposición en el desarrollo de la temática. A profesores, amigos incondicionales como Frank y Richard, y a mis compañeros que estuvieron conmigo en las alegrías y dificulades, y a todas aquellas personas que de una u otro forma hicieron factible este nuevo y gran logro.

TABLA DE CONTENIDO

pagina

ABSTRACT ENGLISH ii

RESUMEN EN ESPAÑOL iii

AGRADECIMIENTOS vii

LISTA DE FIGURAS iii

Índice de Tablas vi

INTRODUCCIÓN 1

1 ASPECTOS GENERALES 3

1.1 EL MODELO ESTÁNDAR 3
1.2 CLASIFICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS 4
1.3 LA FÍSICA DEL BOSÓN DE HIGGS 7

2 OBJETIVO 10

3 EL GRAN COLISIONADOR HADRÓNICO LHC Y EL DETECTOR DE CMS 11

3.1 EL LHC 11
3.2 El DETECTOR CMS 13
3.2.1 SISTEMA DE SEGUIMIENTO 15

4 RECONSTRUCCIÓN 17

4.1 RECONSTRUCCIÓN DE TRAZAS. 17
4.1.1 Generación de la semilla. 17
4.1.2 Reconocimiento patrón o construcción de la trayectoria. . . 18
4.1.3 Resolución de la ambigüedad. 18

4.1.4 Ajustando y alisando la traza. 19
4.2 PARÁMETROS DE LAS TRAZAS 19
4.3 EFICIENCIA EN LA RECONSTRUCCIÓN DE TRAZAS 20
4.4 VÉRTICES PRIMARIOS. 20
4.5 RECONSTRUCCIÓN DE VÉRTICES 21
4.6 ALGORITMOS UTILIZADOS PARA EL AJUSTE DE VÉRTICES. 21
4.6.1 El ajuste de Kalmam. 22
4.6.2 El ajuste Adaptable 22
4.6.3 El buscador "Trimmed" de Kalman 23
4.6.4 El ajuste de la Suma de Gausianas. 23

5 DESCRIPCIÓN DEL DESARROLLO DEL TRABAJO EN PROGRAMACIÓN 25

5.1 DESARROLLO DEL SOFTWARE EN LA RECONSTRUCCIÓN DE TRAZAS 25
5.2 DESARROLLO DE LA RECONSTRUCCIÓN DE VÉRTICES. . 27
5.3 VALIDACIÓN 27

6 RESULTADOS 28

7 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS 36

7.1 TRABAJOS FUTUROS 38

APENDICES 39

A GRÁFICAS 40

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 49

LISTA DE FIGURAS

Figura pagina

1–1 Transición de quark y leptones. Las transiciones entre quarks que corresponden a interacciones fuertes se muestran con líneas gruesas. Las que se muestran con líneas entrecortadas y las punteadas corresponden a transiciones sucesivamente más débiles [2]. 6

1–2 Diagramas de Feynman de los principales mecanismos de producción del bosón de Higgs en la colisión protón-protón. $gg \rightarrow H$, $qq \rightarrow qqH$, $gg \rightarrow tt^{-}H$, $qq^{-} \rightarrow W$, ZH. 8

1–3 Sección eficaz de producción (izq.), y fracción de desintegración (der.) del bosón de Higgs en función de M_H[3]. 8

3–1 Vista esquemática del acelerador LHC en el CERN y sus cuatro detectores ATLAS, LHCb, ALICE,CMS 12

3–2 Diagrama esquemático del detector CMS. Arriba se muestra un corte transversal de éste y abajo un corte a lo largo del rayo 14

3–3 Trazas dejadas por las partículas en los diferentes subdetectores de CMS 16

4–1 Parámetros de las trazas en 2D 19

4–2 Esquema de un vértice primario. 20

6–1 Comparación en los diferentes ajustes del *Res X* y *Res Z* para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^{-}$. 32

6–2 Comparación en los diferentes ajustes del *Pull X* y *Pull Z* para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^{-}$. 33

6–3 Comparación en los diferentes ajustes del *Res X* y *Res Z* para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$. 34

6–4 Comparación en los diferentes ajustes del *Pull X* y *Pull Z* para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$. 35

A–1 Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual Res x y z con el filtro KVF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^-$. 41

A–2 Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual Res x y z con el filtro AVF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^-$. 41

A–3 Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual Res x y z con el filtro TKF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^-$. 42

A–4 Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual Res x y z con el filtro GSF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^-$. 42

A–5 Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual Res x y z con el filtro KVF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$. 43

A–6 Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual Res x y z con el filtro AVF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$. 43

A–7 Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual Res x y z con el filtro TKF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$. 44

A–8 Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual Res x y z con el filtro GSF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$. 44

A–9 Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual *Pull* x y z con el filtro KVF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^-$. 45

A–10 Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual *Pull* x y z con el filtro AVF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^-$. 45

A–11 Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual *Pull* x y z con el filtro TKF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^-$. 46

A–12 Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual *Pull* x y z con el filtro GSF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^-$. 46

A–13 Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual *Pull* x y z con el filtro KVF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$. 47

A–14 Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual *Pull* x y z con el filtro AVF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$. 47

A–15 Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual *Pull* x y z con el filtro TKF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$. 48

A–16 Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual *Pull* x y z con el filtro GSF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$. 48

Índice de Tablas

Tabla pagina

1–1 Clasificación de leptones 5

1–2 Clasificación de quarks 6

1–3 Bosones, partículas mediadoras 7

5–1 Pasos para la reconstrucción de trazas. La prueba de salida es generada, simulada y digitalizada usando la configuración de CMSSW. 26

6–1 Validación de los algoritmos KVF, AVF y TKF para la reconstrucción de vértices primarios, con el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e$ y $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$ en la versión CMSSW 1.2.0 29

6–2 *Validación de los algoritmos KVF, AVF, TKF y GSF para la reconstrucción de vértices primarios, con el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^-$ en la versión CMSSW 1.5.0* 31

6–3 *Validación de los algoritmos KVF, AVF, TKF y GSF para la reconstrucción de vértices primarios, con los decaimientos $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$ en la versión CMSSW 1.5.0* 31

INTRODUCCIÓN

El Modelo Estándar de la física de partículas, SM de acuerdo a sus siglas en inglés, es uno de los modelos más acertados en la ciencia moderna. Este modelo, a pesar de describir las partículas elementales y sus interacciones con una alta precisión, explica la adquisición de masa de las partículas a través del mecanismo de Higgs, el cual presume la existencia de una partícula aún no encontrada experimentalmente, el bosón de Higgs.

Uno de las principales objetivos del LHC ("Large Hadron Collider") es encontrar este bosón y para ello participa activamente el CMS ("Compact Muon Solenoid"), que es uno de los cuatro detectores que hacen parte del experimento. El LHC permitirá obtener mejor precisión en cantidades ya establecidas como por ejemplo la masa del bosón W y explorar la física más allá del Modelo Estándar.

Para alcanzar este objetivo, se necesita determinar con gran precisión los vértices primarios. Estos son requeridos para encontrar las primeras colisiones del cruce de paquetes de protón-protón, en la misma región de la colisión así como en sus vecindades. La precisión de la posición de los vértices primarios es necesaria para realizar análisis de la física de partículas como la del b-hadrón entre otros y los posibles canales de decaimientos del bosón de Higgs.

Para realizar una acertada reconstrucción de vértices es necesario tener un óptimo detector de trazas. El CMS provee un completo sistema de seguimiento, el "Tracker", el cual consta de pixeles y cintas de silicio para registrar el paso de una partícula y poder así realizar una buena reconstrucción de su trayectoria. Este trabajo de investigación busca encontrar el mejor algoritmo de ajuste para reconstruir vértices primarios en el sistema de seguimiento.

Esta tesis se estructuró de tal forma que inicia el capítulo 1 con una descripción del modelo estándar de las partículas elementales y sus interacciones. En el capítulo 2 se presenta el objetivo que persigue este trabajo de investigación. El capítulo 3

ofrece una visión general del experimento LHC y el detector CMS. El capítulo 4 muestra un resumen teórico de la reconstrucción de vértices primarios. El capítulo 5 describe de manera general el trabajo en la programación. El capítulo 6 muestra los resultados y por último las conclusiones y trabajos futuros se encuentran en el capítulo 7.

CAPITULO 1

ASPECTOS GENERALES

El Modelo Estándar da una descripción bastante acertada de la Física de Partículas Elementales y sus interacciones. Debido a su alta concordancia con la precisión experimental es uno de los modelos más acertados en la ciencia moderna. Sin embargo, el Modelo Estándar no alcanza a ser un modelo completo de las interacciones fundamentales debido a que no incluye la gravedad, la cuarta interacción fundamental conocida, y al hecho de presentar limitaciones en la explicación de algunos parámetros numéricos como son la masa de las partículas elementales, algunas constantes de acoplamiento, el origen de la materia oscura o simplemente el por que los protónes y electrónes tienen la misma carga eléctrica con magnitud opuesta.
Este capítulo da una breve descripción del Modelo Estándar y la física del bosón de Higgs, para lo cual para mayor profundidad se dan como guía los textos referenciados [1], [2], [3].

1.1 EL MODELO ESTÁNDAR

El Modelo Estándar agrupa dos importantes teorías: la electrodébil[1] y la cromodinámica cuántica[2] . Técnicamente, la teoría cuántica de campos[3] proporciona el marco matemático para el Modelo Estándar; éste describe cada tipo de partícula

[1] Teoría electrodébil: Teoría física que unifica la interacción débil y la electromagnética.

[2] Cromodinámica cuántica: Teoría cuántica de campos que describe la interacción fuerte.

[3] La teoría cuántica de campos aplica las reglas cuánticas a los campos continuos de la Física, por ejemplo el campo electromagnético, así como a las interacciones entre estos y el resto de la materia.

en términos de un campo matemático. El Modelo Estándar describe las siguientes interacciones:

- **Interacción Fuerte**: La cual es responsable de mantener unidos a protón y neutrón en el núcleo atómico; es una fuerza de corto alcance, los efectos de esta fuerza solo son apreciados a distancias menores de 1 fm[4] .
- **Interacción Débil**: Responsable de ciertos tipos de radioactividad natural, como la desintegración de un neutrón en un protón, un electrón y un neutrino, de las desintegraciones Beta β de los núcleos y de las de otras partículas no elementales de vida media larga; su rango de acción es de $10^{-18}m$.
- **Interacción Electromágnetica**: Unifica los fenómenos eléctricos y magnéticos; se hace presente entre las partículas con carga eléctrica; es responsable de la atracción entre los núcleos atómicos y la nube electrónica. Contrario a la interacción fuerte esta fuerza presenta un alcance infinito $\infty \approx (\frac{1}{r^2})$.

1.2 CLASIFICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS

Según el Modelo Estándar, la materia esta constituida de partículas de espín semientero llamadas fermiones y de espín entero llamados bosones. Los fermiones son clasificados en dos grupos dependiendo de las interacciones que pueden sufrir: leptones y quarks. El grupo de los leptones lo forman aquellos fermiones que no sufren la interacción fuerte. El resto de los fermiones fundamentales se denominan quarks. Tanto los leptones como los quarks se agrupan en tres familias o generaciones y los componentes de cada una se diferencian del resto tan solo en la masa[1]. A cada una de las partículas existentes le corresponde una antipartícula que posee la misma masa, el mismo espín, pero con carga eléctrica opuesta. Algunas partículas como el fotón, son idénticas a su antipartícula.

- **Leptones**: Se distinguen de acuerdo a su carga eléctrica Q[5] , número electrónico L_e, número muónico L_μ y su número tauónico L_τ. Ver la tabla 1–1. Teniendo en cuenta que cada leptón tiene un antileptón se pueden reunir un total 12 leptones como son: el electrón (e^-), el positrón (e^+), el muón (μ^-), antimuón (μ^+), tau (τ^+), antitau (τ^-) y seis neutrinos, neutrino electrónico (ν_e), antineutrino electrónico ($\bar{\nu_e}$), neutrino muónico (ν_μ), antineutrino muónico ($\bar{\nu_\mu}$), neutrino tauónico (ν_τ), antineutrino tauónico ($\bar{\nu_\tau}$)

- **Quarks**: Hay seis sabores de quark: "up" (u), "down" (d), "charm" (c), "strange" (s), "top" (t) y "bottom" (b), al igual que los leptones tienen sus antipartículas

[4] Femtómetro o fermi, es la unidad de longitud que equivale a una milbillónesima parte del metro 1 $fm = 10^{-15}m$

[5] Todas las unidades de carga eléctrica Q, están dadas en unidades de la carga elemental del electrón e=1

Fermiones de espín = 1/2

	l	Masa (GeV/c^2)	Q (e)	L_e	L_μ	L_τ
Primera Generación	e	0.000511	-1	1	0	0
	ν_e	$< 1X10^{-8}$	0	1	0	0
Segunda Generación	μ	0.106	-1	0	1	0
	ν_μ	< 0.0002	0	0	1	0
Tercera Generación	τ	1.7771	-1	0	0	1
	ν_τ	< 0.02	0	0	0	1

Tabla 1–1: Clasificación de leptones

y también son clasificados en tres generaciones. Los quark tienen la característica de tener carga eléctrica fraccionaria de $-\frac{1}{3}$ o $+\frac{2}{3}$, a diferencia de la carga -1 del electrón, o de la carga $+1$ del protón. Sin embargo, como los quarks no se encuentran sólos sino formando hadrones[6] , la suma de las cargas eléctricas de los quarks que constituyen un hadrón, es siempre un número entero. Ver tabla 1–2. Además de que los quark tienen carga eléctrica, también tienen carga de color[7] rojo, verde, o azul, la cual nada tiene que ver con los colores ordinarios, sino que representan una propiedad cuántica que mantiene unidos a los quarks mediante la interacción fuerte, además de ser la responsable de la formación de los hadrones.
La estructura fundamental de las transiciones de las partículas que sufren interacción fuerte, quarks y las que no sufren esta interacción, los leptones, son resumidas en la figura 1–1

- **Mediadores**: Cada interacción tiene una partícula mediadora: En la interacción fuerte la partícula mediadora es el gluón g, bosón de masa nula, que es eléctricamente neutro y con carga de color. Hay ocho tipos de gluones siendo cada uno de ellos una combinación color-anticolor. El hecho de que los gluones tengan carga de color hace que no solo interactúen con los quarks, sino también entre ellos.
  En la interacción débil, los mediadores son los bosones W^+ ,W^- y Z^0. Estos son masivos e interaccionan entre ellos.
  La interacción electromagnética tiene como partícula mediadora el fotón γ, y la interacción gravitacional tiene como partícula mediadora el gravitón g. Ver la tabla 1–3.

[6] Los quarks no se encuentran aislados en la naturaleza sino formando partículas compuestas llamadas hadrones, que se dividen en dos tipos: mesones, formados por un quark y un antiquark (piones, kaones) y bariones, formados por tres quarks (protones, neutrones).

[7] La carga de color tiene analogía con la noción de carga eléctrica, pero con una diferencia muy marcada, pues es una propiedad que no tiene manifestaciones a distancias mayores del tamaño de un ncleo atómico.

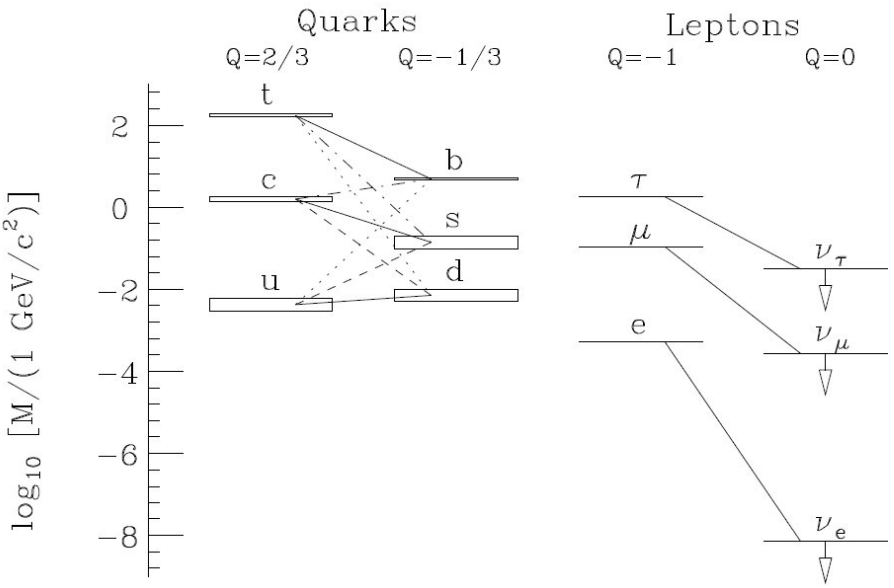


Figura 1–1: Transición de quark y leptones. Las transiciones entre quarks que corresponden a interacciones fuertes se muestran con líneas gruesas. Las que se muestran con líneas entrecortadas y las punteadas corresponden a transiciones sucesivamente más débiles [2].

Fermiones de espín = 1/2

	q	**Masa** GeV/c^2	**Q (e)**	**D**	**U**	**S**	**C**	**B**	**T**
Primera Generación	d	0.006	$-\frac{1}{3}$	-1	0	0	0	0	0
	u	0.003	$+\frac{2}{3}$	0	1	0	0	0	0
Segunda Generación	s	0.1	$-\frac{1}{3}$	0	0	-1	0	0	0
	c	1.3	$+\frac{2}{3}$	0	0	0	1	0	0
Tercera Generación	t	175	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	0	-1	0
	b	4.3	$+\frac{2}{3}$	0	0	0	0	0	1

Tabla 1–2: Clasificación de quarks

Partículas Mediadoras de espín = 1

NOMBRE	MASA (GeV/c^2)	Carga Eléctrica (e)
γ	0	0
W^-	80.39	-1
W^+	80.39	-1
Z^0	91.188	0
g	0	0

Tabla 1–3: Bosones, partículas mediadoras

El Modelo estándar intenta ir más allá de lo que hasta el momento se conoce o se supone y romper con sus limitaciones. Para ello el Modelo Estándar introduce un nuevo elemento, el campo de Higgs, lo cual implica la existencia de una partícula adicional, llamada el bosón de Higgs, que todavía no ha sido encontrado experimentalmente. Se ha encontrado que el bosón de Higgs es una partícula masiva, la cual no posee características como la carga, que usualmente distingue a partículas del espacio vacío [3]. El límite más bajo encontrado de la masa del bosón de Higgs es 114.4 GeV/c^2 [4] y fue dada por la búsqueda directa en el LEP ("Large Electrón Positron Collider") en el CERN ("European Organization for Nuclear Research") y el límite superior se encuentra al rededor de los 200 GeV/c^2 y está dado por las medidas de precisión electrodébil del Modelo Estándar [3].

Normalmente los bosones y los fermiones obtienen sus masas interactuando con el campo de Higgs, también formados en el espacio vacío [5]. Encontrar el bosón de Higgs significa descubrir si existe o no el campo de Higgs y si la actual hipótesis para el origen de la masa es correcta.

1.3 LA FÍSICA DEL BOSÓN DE HIGGS

Varios procesos relevantes contribuyen a la producción del bosón de Higgs en la colisión protón-protón como son: $gg \rightarrow H$ por medio de un "loop" de quarks pesados (fusión de gluones), $qq \rightarrow qqH$ (fusión de bosones débiles), $gg \rightarrow tt^-H$ (producción asociada de tt^-) y $qq^- \rightarrow W$, ZH (producción asociada de bosones débiles) [6].

La importancia relativa de estos procesos depende de la masa del bosón de Higgs M_H, como puede apreciarse en la Figura 1–3 [3](izq), en la que se muestran las correspondientes secciones eficaces en función de M_H.

La fusión de gluones es el proceso dominante en todo el rango de masas, y únicamente para valores muy altos de M_H el proceso de fusión de bosones débiles contribuye de manera significativa. En la Figura 1–3 [3] (der.) aparecen reflejadas las fracciones de desintegración ("branching ratios") del bosón de Higgs en función de su masa. Se observa que para M_H superiores a 135 GeV/c^2 los principales modos

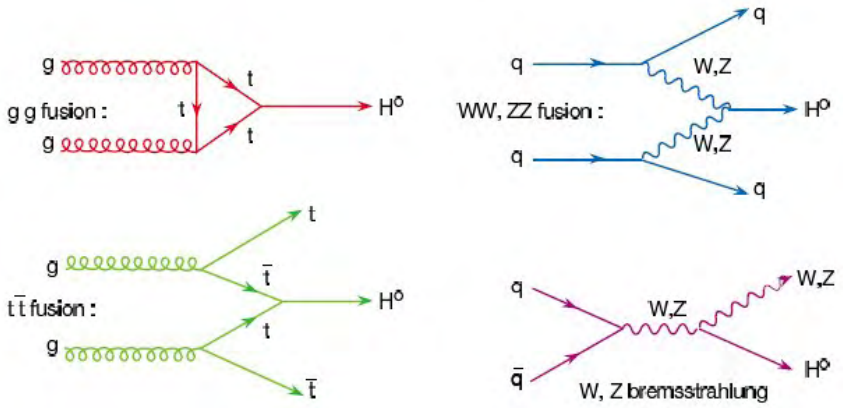


Figura 1–2: Diagramas de Feynman de los principales mecanismos de producción del bosón de Higgs en la colisión protón-protón. $gg \rightarrow H$, $qq \rightarrow qqH$, $gg \rightarrow tt^{-}H$, $qq^{-} \rightarrow W$, ZH.

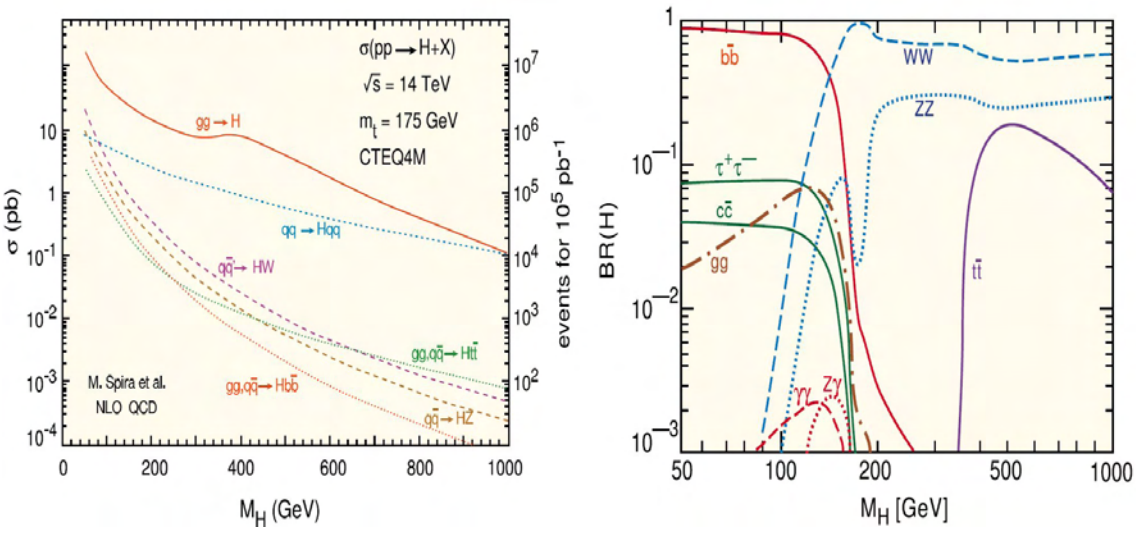


Figura 1–3: Sección eficaz de producción (izq.), y fracción de desintegración (der.) del bosón de Higgs en función de M_H[3].

de decaimiento están entre los pares WW y ZZ, y sus conexiones electrodébiles decaen en tamaños moderados.

Para valores mayores de la masa del bosón de Higgs, comienza a ser factible la producción de pares W^+W^- y Z^0Z^0. La fracción de desintegración es alta, aunque los estados finales puramente hadrónicos continúan siendo de identificación complicada. El canal $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$ (donde $\ell = e,\ \mu,\ \tau,\ \nu$) proporciona una señal muy clara a pesar de que su fracción de desintregración es baja. El canal $H \rightarrow W^+\ W^-$ es también un buen canal de descubrimiento, sobre todo para $M_H \approx 2m_W$, donde tiene lugar el umbral de producción de W^+W^- y la fracción de desintegración de ZZ disminuye drásticamente [6].

Uno de los desafíos principales en la física de altas energías es entender la simetría del campo electrodébil y el origen de su masa. En general el logro del Modelo Estándar está en la elaboración de una descripción unificada de fuerzas en el lenguaje de las teorías del campo cuántico.

CAPITULO 2

OBJETIVO

El detector de CMS del LHC reconstruirá vértices generados de las interacciones entre partículas. Esta reconstrucción se realizará, distinguiendo entre los vértices dejados por la colisión protón-protón (vértices primarios) y los decaimientos posteriores a la primera colisión (vértices secundarios y terciarios). Adicionalmente se generarán ajustes para obtener precisión en la adquisición de un conjunto determinado de trazas, de tal forma que éstas trazas sean compatibles con los vértices. Estos ajustes nos darán exactitud en la reconstrucción de vértices. Los algoritmos de ajuste que han sido validados para tal fin son el KVF, AVF y TKF en la versión $CMSSW120$. El objetivo de este trabajo de investigación es realizar la primera validación del algoritmo de ajuste GSF para la reconstrucción de vértices primarios, en la misma región de la colisión así como en sus vecindades. Lo anterior se iniciará realizando una re-validación de los algoritmos KVF, AVF y TKF en la versión $CMSSW150$ para poder observar su estado actual.

CAPITULO 3

EL GRAN COLISIONADOR HADRÓNICO LHC Y EL DETECTOR DE CMS

Hasta el momento el Modelo Estándar ha sido una teoría efectiva en escalas de los TeV[1] . El detector CMS, es uno de los experimentos construidos en el LHC, el cual está diseñado para explorar energías mayores de los TeV y así estudiar la nueva física en colisiones protón-protón. Este experimento se espera que comience operaciones en el verano 2008. En este capítulo se dará una descripción del LHC y del detector de CMS, específicamente en el sistema de seguimiento ("Tracker").

3.1 EL LHC

El LHC es el proyecto del Laboratorio Europeo de Física de Partículas, CERN. Actualmente está construido en Ginebra (Suiza). Es un acelerador que tiene varios propósitos experimentales como son: ALICE ("A Large Ion Collider Experiment") el cual se dedicará el estudio de los iones pesados. El LHCb ("LHC-beauty") que realizará estudios sobre el quark b. El ATLAS ("A Toroidal LHC ApparatuS") y el CMS ("Compact Muon Solenoid") son experimentos de carácter general cuyo propósito es el estudio de la física en esta nueva región de frontera como por ejemplo encontrar evidencias experimentales de la existencia del bosón de Higgs. Estos cuatro experimentos están ubicados como se muestran en la figura 3–1.
El LHC está diseñado para explorar la nueva física generada a partir de los datos recolectados de las colisiónes protón-protón con una energía en el centro de masa

[1] TeV es una unidad utilizada en física de partículas. Un $TeV = 10^3\ GeV = 10^6\ MeV = 10^{12}\ eV$. Un electronvoltio eV es la cantidad de energía necesaria para mover un electrón a través de una diferencia de potencial de un voltio. $1eV = 1.602176462 \times 10^{-19} J$

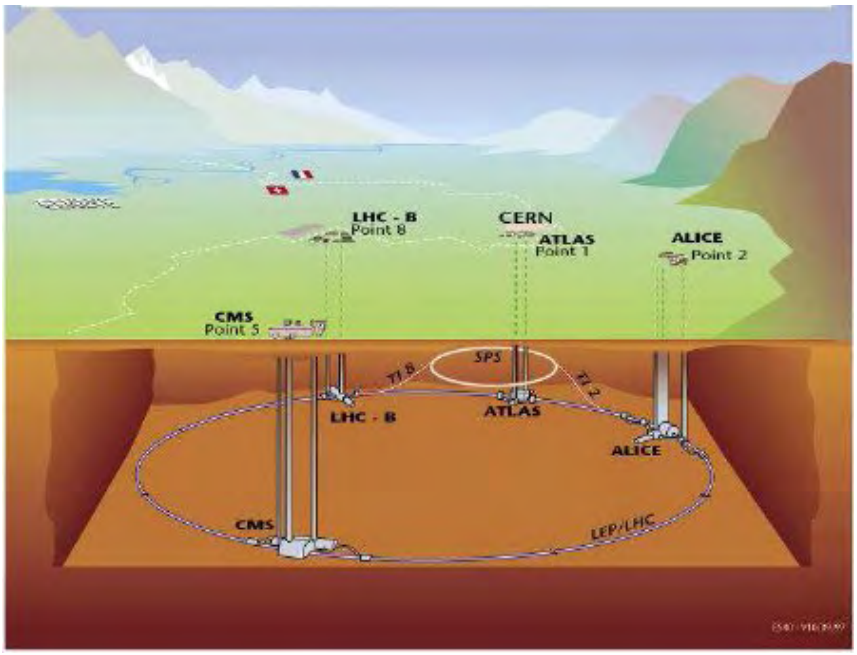


Figura 3–1: Vista esquemática del acelerador LHC en el CERN y sus cuatro detectores ATLAS, LHCb, ALICE,CMS

de 14 TeV, es decir una energía equivalente a 14000 veces la masa del protón y una luminosidad [2] L de $10^{34} cm^{-2} s^{-1}$. Se generarán colisiones de aproximadamente 2808 paquetes de protones con 1.15×10^{11} protones por paquete, espaciados a intervalos de tiempo de 25 ns en un campo magnético de 8.33 T. Por lo tanto se espera que se produzcan 19 interacciones por cruce de haces, es decir 1×10^9 interacciones por segundo por cada experimento.
Un promedio de 25 interacciones suaves ("minimum bias events") ocurrirán simultáneamente en cada cruce de paquetes. Esto da origen, cada 25 ns, alrededor de 1000 partículas cargadas en el detector. Por lo tanto, cuando un evento de gran dispersión es producido durante un cruce de paquetes, éste evento es sobrepuesto con 25 eventos suaves adicionales, los cuáles son llamados "Pile up". El "Pile up" se produce cuando la lectura de un detector de partículas incluye información de más de un evento. Concretamente, se refiere a los casos en que hay otras colisiones (de fondo) en algún momento dentro de una ventana alrededor de la señal de colisión. Es así como los detectores del LHC tiene un tiempo de respuesta rápida entre 20 a 50 ns. Los detectores del LHC también deben tener una lectura de salida externa fina con la finalidad de minimizar la probabilidad de tener presencia de "minimun

[2] La luminosidad es el número de colisiones por unidad de tiempo y de área efectiva de los haces $L = f\frac{n_1 n_2}{A}$, donde f es la frecuencia de colisión de haces compuestos por $n_1 n_2$partículas y A es el área efectiva del solapamiento de los haces. Se mide en unidades inversas de sección eficaz por unidad de tiempo. Al integrar esta cantidad durante un periodo de tiempo se obtiene la luminosidad integrada, la cual se mide en unidades inversas de sección eficaz, fb^{-1} ó pb^{-1}

bias events" en el mismo canal donde hay eventos interesantes. Esto implica tener un número de canales electrónicos bastante grande.

La tarea inicial del LHC será observar el bosón de Higgs y estudiar sus propiedades, conseguir medidas de precisión con el potencial del bosón y estudiar la física nueva más allá del Modelo Estándar. Por ejemplo, probar la teoría Supersimetrícа, estudiar la violación CP (Carga, Paridad) de los b-hadrones y la investigación de la física del ion pesado. La posibilidad de generar altas energías con iones pesados es 30 veces mayor que las logradas en los anteriores aceleradores. Se proyecta el uso de escalas más amplias en el programa de física de iones pesados. Además incluiría estudios sobre la materia nuclear caliente entre otras [7].

3.2 El DETECTOR CMS

En CMS participan alrededor de 2000 personas entre científicos e ingenieros, de más de 150 instituciones distintas, y alrededor de unos 35 países. Es uno de los experimentos que ha tenido mayor participación científica.
El detector CMS está constituido por un barril cerrado por dos discos de 21.6 m de largo, 14.6 m de diámetro y un peso de 12500 toneladas. Un campo magnético de 4T creado por un solenoide superconductor de 13 metros de largo y 5.9 metros de diámetro interno y un campo magnético residual a 1.5 m. Posee 4 estaciones detectoras de muones, cada una compuesta de capas de aluminio.

El detector de CMS permite detectar, identificar y medir partículas como electrones, muones, fotones, jets, entre otros. Tiene una cobertura espacial muy grande para detectar pérdidas de energía y rangos de energía bastante grande.

El detector tiene 16 millones de canales de lectura los cuales se encuentran distribuidos en el barril y en sus tapas. En el interior del solenoide se encuentran, desde la línea de interacción de los haces, hacia fuera, el sistema de seguimiento ("Tracker"), el ECAL, calorímetro electromagnético y el HCAL calorímetro hadrónico. El HCAL esta elaborado en bronce, mide la energía de los hadrones y electrones con gran aproximación. El ECAL esta elaborado de $PbWO_4$ (tungstanato de plomo) y está adecuado para medir la energía de los fotones, los cuales combinándolos podrían reconstruir señales de π^0. El sistema de seguimiento provee el seguimiento de las trayectorias de las partículas. El detector central reconstruye y mide trazas de partículas cargadas estables como muones, electrones y hadrones cargados (π, κ, p).
La capa final del CMS está cubierta por fotodiodos y fototriodos de silicio para la selección de centelleos luminosos. Ver figura 3–2

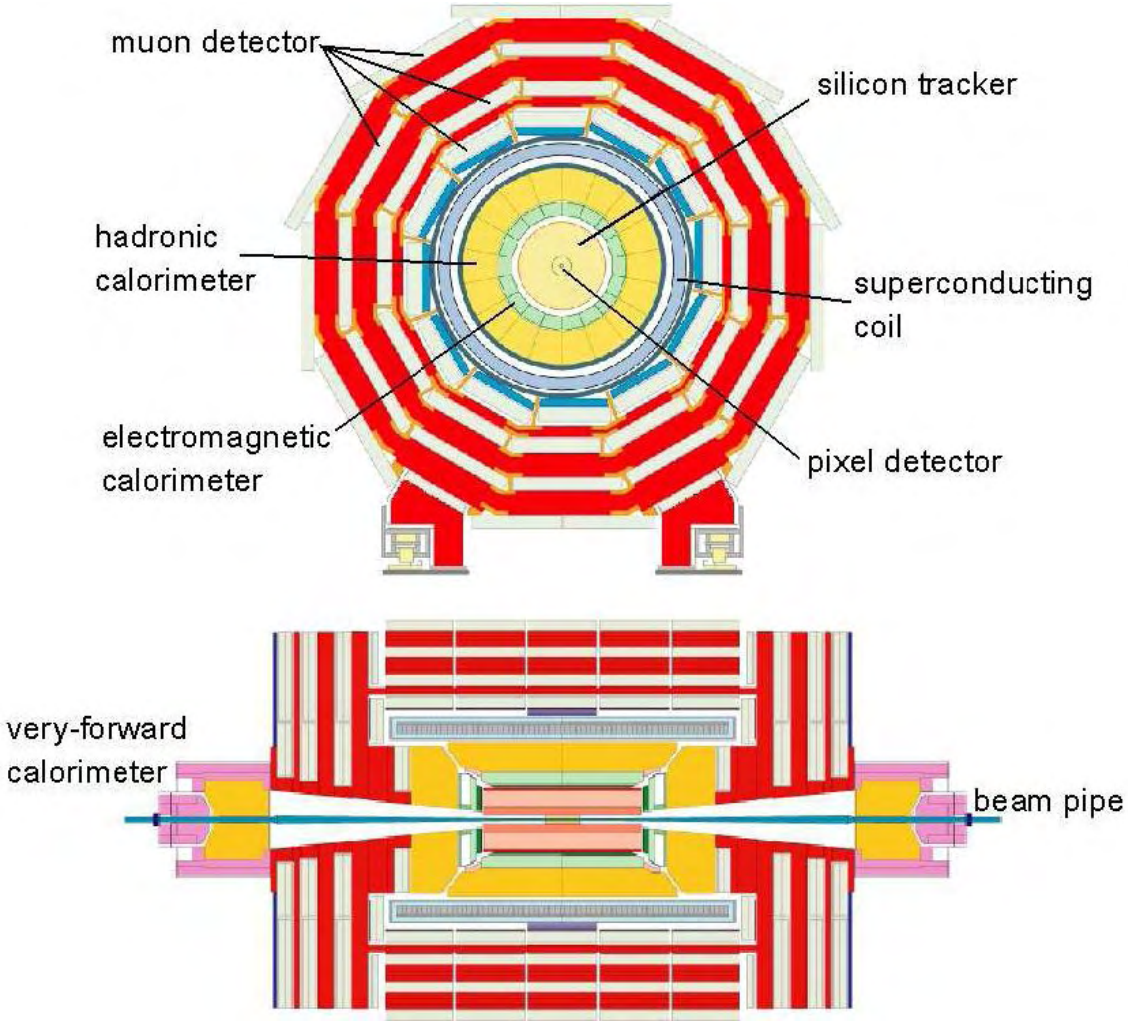


Figura 3–2: Diagrama esquemático del detector CMS. Arriba se muestra un corte transversal de éste y abajo un corte a lo largo del rayo

El sistema de coordenadas utilizado en CMS es un sistema dextrógiro[3] , con el eje x apuntando hacia afuera del LHC, el eje z se toma paralelo a la dirección del haz de partículas, y el eje y apuntando hacia arriba. Sin embargo, se suele utilizar el sistema de coordenadas siguiente: en el plano transversal al haz, la geometría viene dada por las coordenadas (r,ϕ), donde ϕ es el ángulo azimutal en el plano xy; en el plano longitudinal, el eje z sigue siendo el paralelo al haz y el ángulo polar θ se define con respecto a ese eje. En lugar del ángulo θ, se utiliza la pseudorapidez[4] , $|\eta| = -ln(tan\frac{\theta}{2})$. El detector presenta simetría cilíndrica en la zona de baja pseudorapidez (barril) y está distribuido en discos en los tapas del barril, que son las zonas de alta pseudorapidez. A lo largo del eje central del cilindro se extiende el tubo por el que se desplazan los dos haces de partículas (dirigidos uno contra el otro). La colisión de los haces tiene lugar en el centro del cilindro.

3.2.1 SISTEMA DE SEGUIMIENTO

Debido al alto porcentaje de colisión entre los paquetes de protones, el gran número de eventos y su gran radiación alrededor de los puntos de interacción de los haces, se necesito una tecnología capaz de resolver las interacciones con alta precisión siendo escogido los materiales de silicio.

El sistema de seguimiento tiene un volumen conformado por 10 capas de silicio de 5.8 m de largo y 2.6 m de diámetro. La parte interna del sistema de seguimiento está compuesta por tres capas de píxeles de silicio y la parte externa está constituida por tiras de silicio, las cuales cubren al ("Tracker") hasta una pseudorapidez de $|\eta| = 2.4$.
El sistema de seguimiento, requiere de una gran cantidad de potencia a bajo voltaje, lo cual demanda grandes cantidades de disipación de calor. Por ende el sistema de seguimiento, es un material formado por cables de potencia y enfriadores, la parte que no es sensitiva conforma la estructura y la electrónica de la pantalla. El sistema tiene tres capas de detectores en microcinta de silicio que llegan a la región de la interacción de la parte interna del detector CMS. El sistema de seguimiento interno es una de las partes más importantes del detector y desempeñará papeles importantes en todas las búsquedas que sean emprendidas por el grupo del CMS. El sistema de seguimiento interno es esencial para captar con precisión muones, especialmente en el rango de energías bajas. También sirve para la determinación de la carga de partículas en la muestra con energías inferiores a 2 TeV. Ver fig 3–3

[3] Sistema Dextrógiro: sistema que gira en sentido de las manecillas del reloj

[4] La Pseudorapidez, η, es una coordenada espacial que describe el ángulo formado por una partícula y el eje del haz. Mientras que θ aumenta la pseudorapidez disminuye.

El detector requiere de una alta precisión en la demarcación de los eventos provocados en la colisión para hacer una buena reconstrucción de vértices. Su importancia radica en cuantificar los parámetros del impacto de las partículas cargadas, medir las trazas dejadas por estas y adicionalmente medir la posición de vértices. El sistema de seguimiento determina el momento de las partículas y su carga por medio de la curvatura de la trayectoria dejada por estas.
El bosón de Higgs, el quark top son partículas pesadas que decaen típicamente en partículas más livianas como el W o Z y quark b, estos a su vez decaen a partículas ligeras y estables, dejando muchas trazas agrupadas y separadas de otras trazas. Estas trazas agrupadas se llaman chorros ("Jets") y necesitan ser estudiadas y catalogadas de acuerdo con su origen, como por ejemplo los "Jets" de quark b, "Jets" de quark c, etc.

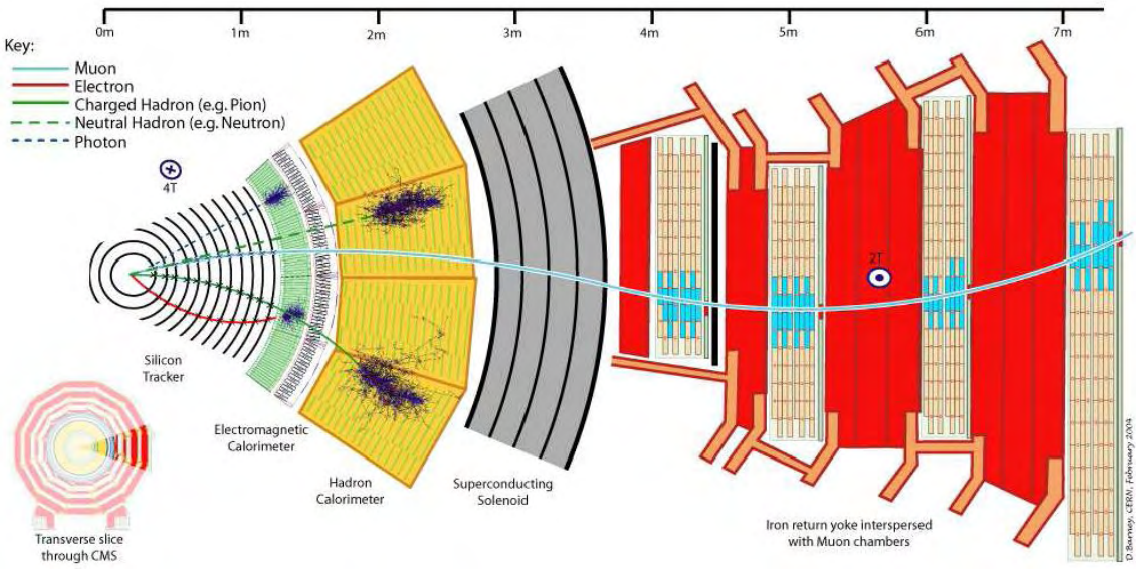


Figura 3–3: Trazas dejadas por las partículas en los diferentes subdetectores de CMS

CAPITULO 4

RECONSTRUCCIÓN

Un vértice en un detector está determinado por las trazas y el tiempo de vida de las partículas cargadas que son producidas en este vértice. Este capítulo describe los principales pasos que se deben realizar en la reconstrucción de dichas trazas y vértices en CMS. Además se dan algunos detalles sobre los algoritmos para ser utilizados para tal reconstrucción.

4.1 RECONSTRUCCIÓN DE TRAZAS.

La reconstrucción de trazas necesita una búsqueda eficiente de impactos ("hits") en las capas del detector y una propagación rápida de las posibles trazas candidatas a trayectorias. En el sistema de seguimiento del CMS, la primera parte de la reconstrucción es simplificada por el arreglo de módulos sensibles en las capas que son prácticamente herméticas para las partículas que se originan en el centro del detector. La segunda parte utiliza el hecho de que en el sistema de seguimiento, el campo magnético, es constante. También es de gran ayuda el tener las capas monitoreadas por sensores. El modelo matemático tomado para la reconstrucción de las trazas es el helicoidal y uno de los parámetros tenidos en cuenta en esta reconstrucción es la distancia entre las capas [7], [8]. A partir de los impactos reconstruidos, la reconstrucción de las trazas está dada en cuatro pasos, como veremos más adelante.

4.1.1 Generación de la semilla.

Este primer paso proporciona trayectorias candidatas para la reconstrucción completa de la traza. Una semilla debe tener definidos parámetros al igual que errores iniciales de la trayectoria. Estos pueden ser obtenidos de dos maneras, una forma es externamente al sistema de seguimiento, usando entradas de otros detectores, en la cual la precisión inicial de los parámetros de las trayectoria no presenta,

generalmente, buena información. Otro camino es la construcción de semillas internamente, en este caso cada semilla se considera que está compuesta por un conjunto de impactos reconstruidos y que vienen a partir de la primera traza de la partícula cargada.

La semilla de una trayectoria es el punto de partida para continuar con el segundo paso, el reconocimiento patrón en el sistema de seguimiento. La semilla debe seguir unos parámetros establecidos de las trazas, los valores de estos parámetros deben estar lo suficientemente cerca de los valores verdadero para permitir el uso de los algoritmos establecidos para hacer ajustes como por ejemplo el ajuste de Kalman. La incertidumbre de los parámetros debe ser lo suficientemente pequeña como para permitir la búsqueda de los impactos en una región razonablemente [7],[8],[9].

4.1.2 Reconocimiento patrón o construcción de la trayectoria.

Éste paso está basado en el método combinatorio del filtro del Kalman[1] . El filtro procede realizando un proceso iterativo entre las semillas localizadas en las capas, comenzando de una estimación gruesa del los parámetros de la traza proporcionados por la semilla, e incluyendo la sucesiva información detectada en las capas una por una. En cada capa, es decir, con cada nueva medida, los parámetros de la traza se dan con una mejor precisión, hasta el punto donde se incluye la información completa del sistema de seguimiento [7],[8],[9].

4.1.3 Resolución de la ambigüedad.

La ambigüedad en encontrar una traza se presenta porque una traza dada puede ser reconstruida a partir de diversas semillas, o porque una semilla dada puede dar lugar más a de una traza candidata de la trayectoria. Estas ambigüedades, deben ser resueltas para evitar cuentas dobles de las trazas, de tal forma que se tengan en cuenta la reconstrucción de trazas de una misma semilla [7],[8],[9].

[1] El filtro del Kalman es un procedimiento matemático que opera por medio de un mecanismo de predicción y corrección. Este algoritmo pronostica el nuevo estado a partir de su estimación previa añadiendo un término de corrección proporcional al error de predicción, de tal forma que este último es minimizado estadísticamente. El filtro de Kalman proveen una buena solución del método de mínimos cuadrados. Esta solución permite calcular un estimado lineal, óptimo del estado de un proceso en cada momento basado en la información disponible en el momento t-1, y actualiza, con la información adicional disponible en el momento t, dichas estimaciones.

4.1.4 Ajustando y alisando la traza.

En la etapa de la construcción de la trayectoria, se da lugar a una colección de impactos y a valores estimados de los parámetros de la traza. Estos valores puede ser influenciados por las restricciones que fueron aplicadas en la primera etapa (generación de la semilla). Sin embargo, la información completa está unicamente disponible con los últimos impactos que hacen parte de la trayectoria. Luego la trayectoria se reajusta y se suavisa usando una aproximación de los mínimos cuadrados, la cual se pone en ejecucion por una combinación del filtro del Kalman. El filtro de Kalman comienza con la localización de los impactos más cercanos al haz. El ajuste entonces procede de una manera iterativa a través de la lista de impactos. Para cada impacto válido se reevalúa la estimación de la posición usando los valores actuales de los parámetros de la traza. La información sobre el ángulo de incidencia de los impactos en los módulos del pixel, la cual ayuda a aumenta la precisión de la medida [7],[8],[9].

4.2 PARÁMETROS DE LAS TRAZAS

Cinco parámetros se eligen para describir una traza: d_0, z_0, φ, $cot\theta$, y el momento transverso P_T[7]. Los parámetros de la traza son definidos en el punto más cercano de la traza al eje del haz llamado el punto de impacto o parámetro de impacto; por lo tanto las coordenadas d_0 y z_0 son medidas del punto del impacto en el plano transversal y longitudinal ($d_0 = y_0 cos\varphi - x_0 sin\varphi$, donde x_0 y y_0 son coordenadas transversales del punto de impacto). El ángulo azimuthal del vector de momento de la traza, φ, se toma en el punto de impacto, y θ que es el ángulo polar. Ver figura 4–1

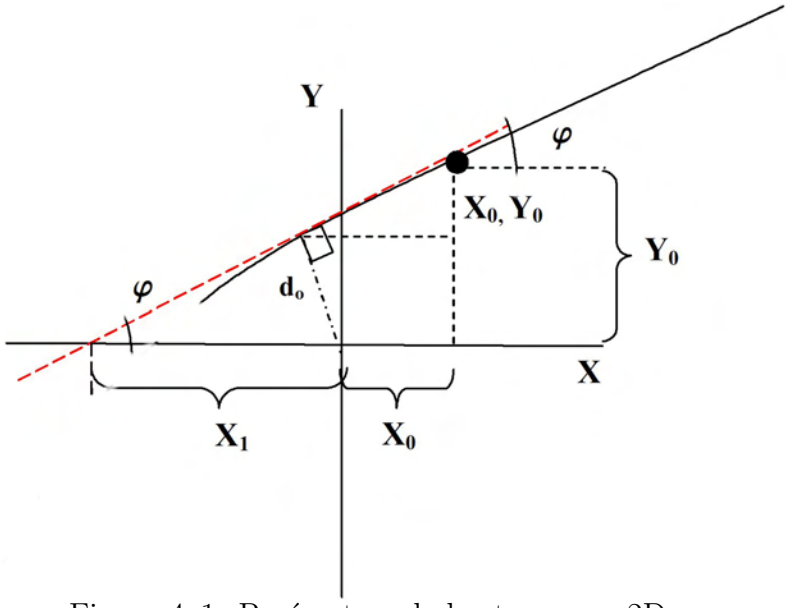


Figura 4–1: Parámetros de las trazas en 2D

4.3 EFICIENCIA EN LA RECONSTRUCCIÓN DE TRAZAS

La eficiencia en la reconstrucción de trazas con el filtro del Kalman ha sido estimada usando ejemplos de muones y piones con $\vec{P_T}$ o momento transverso[2] de 1, 10, y 100 $\frac{GeV}{c}$. Para ese análisis, las trazas reconstruidas usaron los paso detallados anteriormente: búsqueda de semillas en el detector de Pixel, el reconocimiento patrón, la resolución de la ambigüedad y por último el ajuste de trazas. La reconstrucción de trazas requiere tener un mínimo de 8 impactos, con pérdida de uno a dos impacto por capa, y un $\vec{P_T}$ mayor de 0.8 $\frac{GeV}{c}$. Se estima que se ha reconstruido una traza con éxito si al hacer la simulación de trazas, por lo menos, las trazas reconstruidas y las simuladas, comparte más del 50 % de impactos [7]. Los parámetros más importantes para tal selección son el número de impactos usados en el ajuste de la traza, el número de impactos inválidos, y el χ^2.

4.4 VÉRTICES PRIMARIOS.

El vértice primario (PV), esta definido como la posición de las colisiones iniciales de las partículas, en este caso colisión protón-protón. Casi todos los procesos de la física de partículas tienen como definición de vértices primarios el punto en donde ocurre el decaimiento. En el LHC la distancia del paquete de protones que atraviesa la región en la dirección del plano transverso (x y y) a la línea del haz de colisión es de 15 μm, así que los vértices primarios se deben encontrar cerca de esta línea, alrededor de esta distancia. Ver figura 4–2.

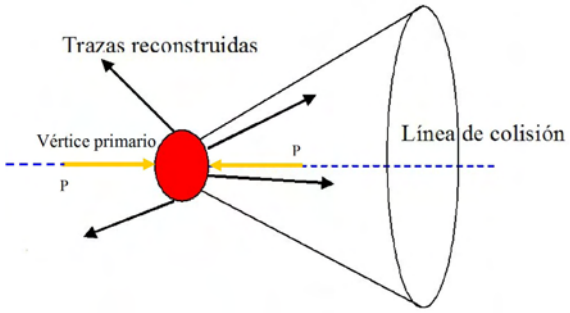


Figura 4–2: Esquema de un vértice primario.

[2] El $\vec{P_T}$ o momento transverso hace referencia a la suma vectorial de la descomposición del momento en el plano x y y, es decir $\vec{P_T}$=$p_x\vec{i} + p_y\vec{j}$.

4.5 RECONSTRUCCIÓN DE VÉRTICES

La reconstrucción de los vértices implica generalmente dos pasos, encontrar el vértice y ajustarlo. El encontrar el vértice implica agrupar las trazas en candidatas a vértices. Para encontrar los vértices se pueden tener diferentes algoritmos de ajuste. El ajuste de vértices implica el determinar la mejor estimación de los parámetros del vértice como son la posición, la matriz de covarianza[3] , seguir los parámetros de las trazas para dado sistema de trazas, también como indicadores de la calidad se tiene el χ^2 total, el número de grados de libertad o los pesos de la traza[10].

La reconstrucción de vértices puede darse de dos formas. Una reconstrucción exclusiva en la cúal el sistema de trazas se acomoda a un vértice y no es necesario encontrar el vértice. Se utiliza por ejemplo para la física del quark b, donde las trazas pertenecen al b-hadrón. En contraste con una reconstrucción inclusiva en donde el algoritmo tiene que decidir, qué trazas son candidatas a pertenecer a vértices primarios. La reconstrucción de vértices primarios o de b-tag son de uso típicos para una reconstrucción inclusiva. Si todas las trazas reconstruidas se dan a la tarea de buscar vértices, esta reconstrucción es llamada una reconstrucción global, si solamente una parte de las trazas, como las trazas en un chorro ("jet"), se dan a la tarea de buscar un vértice se dice que es una reconstrucción local. Para este trabajo los vértices primarios se han reconstruido de forma global [11].

4.6 ALGORITMOS UTILIZADOS PARA EL AJUSTE DE VÉRTICES.

Varios algoritmos han sido estudiados, evaluados y utilizados para el ajuste de la reconstrucción de vértices. Los algoritmos implementados se dividen en lineales o mínimos cuadrados y no lineales. Los algoritmos que manipulan los mínimos cuadrados utilizan todas las trazas con una unidad de peso, los algoritmos no lineales son adecuados para unidades de peso bajas o descartar trazas y son así menos sensibles a los más alejados, puesto que los pesos de las trazas dependen de sus distancias al vértice.

Ha sido elegida una parametrización para describir trazas de partículas cargadas en un campo magnético donde la trayectoria de la partícula es modelada por una ecuación helicoidal. Esta parametrización es elegida de acuerdo a un punto de referencia o punto de linealización[4] en este caso, y define a la traza como los puntos

[3] Los elementos de la matriz de covarianza contiene las varianzas de las variables cuantitativas asociadas a cada vértice.

[4] Si no es provista una posición inicial, se calcula una rápida aproximación de la posición del vértice, esta posición es llamada punto de la linearización, este punto es el punto de una expanción lineal de la ecuación que describe la dependencia de los parámetros medidos de la traza.

más cercanos a los puntos de referencia[12]. Para una partícula cargada los cinco parámetros son:

- ε_ρ**:** Distancia transversa más cercana al punto de referencia. Por convención la señal es positiva si el punto de referencia está a la izquierda del punto más cercano y la trayectoria es $+2\pi$.
- Z_ρ**:** Distancia longitudinal más próximo del punto.
- θ**:** Ángulo polar del vector de momento.
- φ_ρ**:** Ángulo azimuthal del vector momento más cercano al punto.
- ρ **:** Señal transversa de la curvatura, donde la señal de la carga es negativa. Para describir partículas neutrales, se utiliza una modificada parametrización para el punto más cercano, donde la señal transversal de la curvatura es sustituida por el inverso del momento transverso $\frac{1}{P_T}$.

4.6.1 El ajuste de Kalmam.

Este es el algoritmo más frecuente para la reconstrucción de vértices cuyas siglas son KVF ("Kalman Vertex Fitter"). La matemática es equivalente a una minimización global de los mínimos cuadrados que es el caso más óptimo cuando el modelo es lineal, todo el ruido al azar es Gaussiano y no hay medidas periféricas. En este caso, el estimado es imparcial y tiene una varianza mínima. Las cantidades estimadas de la distribución residual ("Res") y la distribución residual estandarizada ("Pull") tienen distribuciones Gausianas y el valor de la función objetiva (la cual es una función minimizada) para el mínimo obedece a la distribución de χ^2 . Para modelos no lineales o ruidos no -Gaussianos esta estimación lineal sigue siendo óptima. A pesar de todo es muy sensitivo a las más lejanas, y se inclina a los ajustes de los parámetros y tiene tendencia a los parámetros proporcionales más alejados. Este filtro también puede dar una estimación mejorada de los momentos de la traza usando el vértice, dando orígenes a matrices de covarianza por cada traza[12], [13].

4.6.2 El ajuste Adaptable

Este algoritmo conocido por sus siglas en inglés AVF ("AdaptiveVertexFilter") es el más robusto. Se ha demostrado que este algoritmo es muy estable con una alta cantidad de puntos averiados. El AVF no esta sujeto a un ajuste en particular. El AVF es una iteración reponderada del ajuste de mínimos cuadrados con bajo peso según las distancias estandarizadas de las trazas (χ^2) a los vértices. Este algoritmo tiene la ventaja de que los pesos pueden ser fraccionarios (asignación suave) y que ellos varían de una iteración a la siguiente, hasta que el ajuste converge . No se

necesita ninguna estimación anterior de los pesos de las trazas. La función de peso es de la forma de una función sigmoidea [5] [12], [14].

4.6.3 El buscador "Trimmed" de Kalman

El TKF ("Trimmed Kalman Finder") , es la versión robusta del KVF ("Kalman Vertex Fitter") donde primero todas las trazas de entrada son ajustadas en un vértice. Las trazas menos compatibles con ese vértice son removidas una a una comenzando con la traza menos compatible y el vértice es reajustado. Este procedimiento es repetitivo hasta que la compatibilidad de todas las trazas están por debajo del valor umbral dado. Una vez rechazada una traza, esta no será incluida nuevamente en el vértice. La compatibilidad de cada traza con el vértice es calculada con la distancia estándar al vértice. La distancia apropiada es distribuida de acuerdo a dos grados de libertad (un grado de libertad para un vértices con dos trazas) [12].

4.6.4 El ajuste de la Suma de Gausianas.

El algoritmo GSF ("GaussianSumFitter") fue desarrollado al igual que los anteriores para la reconstrucción de vértices[15]. Es basado en la suma de Gausianas. Mientras que el estimado lineal es óptimo para cuando las observaciones de errores tienen distribución Gaussiana , el GSF es mejor para cuando las distribuciones de error son no-Gausianas, donde se ha visto que en la presencia de colas grandes, el GSF tiene variación más pequeña que el KVF. Este algoritmo es particularmente útil para la reconstrucción del electrón, en donde la pérdida de energía no es del todo Gausiana y puede ser modelada usando una mezcla de ajustes Gausianos.

El ajuste, como en los anteriores algoritmos, requiere un procedimiento iterativo, donde la estimación de los vértices se actualiza con las trazas con el paso del tiempo. Cuando una traza se agrega al vértice, cada una de las componentes de la mezcla del estado del vértice se actualiza con cada componente de la mezcla de la medida de las trazas por un KVF. Con eficacia se hace una combinación exhaustiva de los componentes de las dos mezclas. Además, el peso de cada una de las combinaciones tiene que ser computada. El número de componentes estimados del vértice se incrementa de forma exponencial, y cada paso es multiplicado por el número de componentes modelando la nueva traza.

[5] La función sigmoidea o curva logística, es un función en donde su estado inicial de crecimiento es aproximadamente una exponencial y al cabo de un tiempo la tasa de crecimiento disminuye, finalmente, el crecimiento se detiene.

Las medidas ambigüas son modeladas por una mezcla de dos Gausianas con diferente promedios[16], pero desviaciones idénticas. Así ambas soluciones de una medida ambigüa son utilizadas concurrentemente para determinar la posición correcta de la traza. No hay necesidad de asignar explícitamente una u otra solución para la traza. La precisión estadística completa puede ser obtenida considerando múltiples dispersiones y bajas energías como procesos de ruido. Esto se puede hacer por el modelo Gausiano o incluso por uno no-Gausiano , dependiendo del caso. Por ejemplo, es posible modelar las colas de la dispersión múltiple para las partículas de poca energía, o la pérdida de energía altamente asimétrica de electrones por una adecuada suma de Gausianas. Si el nivel del ruido es alto el filtro debe ser robusto en su rango. Esto es alcanzado modelando las medidas como una mezcla de dos Gausianas con promedios idénticos, pero diversas desviaciones.

Todas las distribuciones de los parámetros de las trazas son mezclas de Gausianas. Cada componente de la mezcla es propagada y actualizada por el filtro estándar de Kalman. Así el filtro de la suma Gaussiana es equivalente a fusionar varios filtros de Kalman en paralelo. La orden para acelerar el filtro, es suprimir los componentes insignificantes después de cada paso del filtro. El filtro de suma de Gausianas no requiere iteraciones, pues la estimación se calcula en un solo paso del filtro. En el extremo de las trazas la estimación final y de su matriz de covarianza se obtienen a partir de los momentos de la distribución posterior a la final. Entonces un segundo filtro puede ser ejecutado en la dirección opuesta.

El promedio del peso es el promedio de la suma de los pesos de las trazas normalizadas por el número de trazas iniciales asociado a cada vértice. Para el filtro de Kalman, todas las trazas se utilizan con unidad de peso, mientras que para el TKF ("Trimmed Kalman Finder"), el peso de una traza desechada es cero, y el peso medio es equivalente a la fracción media de las trazas restantes. El porcentaje de falla es la fracción de los vértices ajustados donde no convergió cualquiera de los ajustes, o la suma de los pesos de todas las trazas fue más pequeño de 1.

CAPITULO 5

DESCRIPCIÓN DEL DESARROLLO DEL TRABAJO EN PROGRAMACIÓN

El experimento en general presenta dos partes importante. Una de ellas es el "hardware", el cual, en gran parte, hace referencia a el desarrollo y la construcción del experimento y por otro lado encontramos el "software", el cual nos proporciona un análisis físico de datos registrados, que es el enfoque de esta investigación.

5.1 DESARROLLO DEL SOFTWARE EN LA RECONSTRUCCIÓN DE TRAZAS

En la reconstrucción de trazas, el primer paso es utilizar toda señal registrada en el sistema de seguimiento, lo cual ayuda a realizar el rastreo y así comenzar a medir trazas dejadas por las partículas elementales. El proceso de reconstrucción, ahora visto a groso modo se divide en una fase inicial donde se encuentran los puntos de partida para las trazas (Generación de semilla), seguidos por la colección de todas las medidas que corresponden a una traza, (reconocimiento del patrón o construcción de trayectorias). El paso final consiste en un ajuste de las medidas recogidas (ajuste final) que producen las trazas. Ver tabla 5–1.

En el momento, hay dos ideas expuestas en dos algoritmos que se han estado desarrollando en CMSSW[1] . El primer algoritmo utiliza el sistema de pixeles y las cintas del detector para encontrar la semilla, con el cual se realiza un proceso

[1] CMSSW es la infraestructura del software oficial de CMS, la cual se usa para generar, simular, digitalizar y análizar datos, así como para hacer la reconstrucción y el análisis tanto de datos simulados como de datos reales.

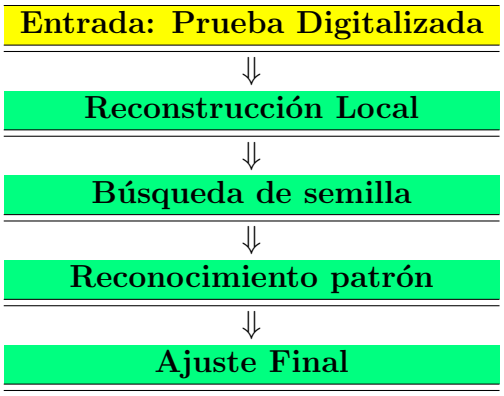


Tabla 5–1: Pasos para la reconstrucción de trazas. La prueba de salida es generada, simulada y digitalizada usando la configuración de CMSSW.

iterativo que va de capa en capa del sistema de seguimiento, teniendo en cuenta las dispersiones múltiples que se presenten. Luego se continúa con el siguiente paso, el reconocimiento patrón o construcción de trayectorias usando la técnicas del ajuste de Kalman. Este primer algoritmo es llamado "CombinatorialTrackFinder" y es el que CMSSW utiliza por defecto. Los estudios realizados hasta el momento y presentados en el PTDR, ("Physics Technical Design Report") fueron ejecutados con este algoritmo, el cual ahora se nombra CTF por sus siglas en inglés.
El segundo algoritmo utiliza solamente las cintas del sistema de seguimiento, para encontrar la semilla, y abre los caminos alrededor de la trayectoria de la semilla para recoger medidas, este es llamado "RoadSearchSeedFinder".

Después de poner ambas técnicas en práctica, se usa un ajuste final usando la técnica de Kalman para producir las trazas la cual se conoce como "TrackProducer". La estructura modular seguida durante la puesta en práctica del seguimiento en CMSSW permite el intercambio de diversos componentes de las dos técnicas y abre la posibilidad para integrar fácilmente nuevas ideas para reconstruir trazas.

Los dos tipos de trazas reconstruidas por los dos tipos de algoritmos ya mencionados son; la RS ("RoadSearch") y la CTF ("CombinatorialTrackFinder"), las cuales se encuentran en los módulos que se proveen en línea, en la página web del CVS [17] ("Concurrent Versioning System") del CMSSW, la cual es el deposito del lanzamiento del código de CMS.

Para este trabajo de investigación, la reconstrucción de Muones utilizo los tipos de trazas CTF en los algoritmos de ajuste KVF, AVF, TKF, mientras que para reconstruir electrones las trazas utilizadas en el ajuste GSF fueron las "GsfTrack". Las trazas "GsfTrack" fueron diseñadas de tal manera que contienen la información de la pérdida de energía de los electrones por radiación.

Los electrones se pueden reconstruir con las trazas CTF descrita arriba, pero constituyen un caso especial debido a la naturaleza altamente no-Gausiana de la

pérdida de energía. Es por ello que una extensión del ajuste de Kalman ha sido desarrollado para estos casos: el ajuste GSF de la suma de Gausianas. En vez de usar solamente la desviación estándar, describe el espectro de la pérdida de energía por medio de una suma de Gausianas. Esta descripción es más exacta, pero el ajuste es considerablemente más lento.

5.2 DESARROLLO DE LA RECONSTRUCCIÓN DE VÉRTICES.

El buscador por defecto de vértices primarios PVF ("Primary Vertex Finder") en CMSSW realiza reconstrucciones de vértices primarios usando todos las trazas reconstruidas en el evento. Hay cuatro pasos principales que son:

- Reselección de trazas basados en la distancia más cercana entre el haz y la traza (el parámetro de impacto d_0) y el P_T.
- Formación de agrupaciones de trazas basados en la coordenada z del punto más aproximado a la línea del haz (las trazas más cercanas de 1mm son agrupadas).
- Un ajuste de candidatos a vértices primarios por cada una de esas agrupaciones, descarta trazas incompatibles con vértices candidatos.
- La exclusión de ajustes inferiores al 1% de la probabilidad (χ^2 probabilidad $< 1\%$) y vértices incompatibles con la línea del haz (probabilidad $< 1\%$).

5.3 VALIDACIÓN

Existe un paquete de software en CMSSW que lleva a cabo el proceso de validar los algoritmos que se han desarrollado con propósitos determinados. Esta validación se ha dado de forma gráfica y así se ha podido verificar nuevas revisiones del programa.

En el caso de la elaboración de esta investigación, el paquete usado para evaluar la producción de vértices primarios, fue "Validation/RecoVertex", el cúal también se encuentra en la web CVS del CMSSW [17], [18] . Esta validación se realizó para los algoritmos de ajuste de vértices primarios KVF, AVF y TKF con el tipo de trazas CTF. Para el algoritmo GSF las trazas que se utilizaron fueron "GsfTrack". Con estas validaciones se quiere mostrar los mejores valores obtenidos de acuerdo a los datos encontrados. Es de resaltar que la validación para el algoritmo de ajuste GSF fue la primera realizada en el software de CMS.

CAPITULO 6

RESULTADOS

Los algoritmos que se han generado y estudiado en CMSSW, para encontrar el mejor ajuste de vértices fueron los ya mencionados **KVF, AVF, TKF** y **GSF**. Estos ajustes dado un conjunto de trazas, calcula la mejor estimación de los parámetros para vértices como son: posición, matriz de covarianza, parámetros obligatorias de las trazas y sus covarianzas, así como los indicadores de los sucesos del ajuste: χ^2 total, número de grados de libertad, pesos de la traza.
Parte del trabajo de validación está en hacer la reproducción de los resultados obtenidos en la validación de los algoritmos de ajuste **KVF, AVF, TKF**. La validación para estos algoritmos primero fué realizada en la versión de $CMSSW$ 120[1] , la cúal se muestra en la Tabla 6–1. La reproducción se hace con el fin de comparar y verificar el estatus que hasta el momento se estaba presentando de los algoritmos. Esta reproducción de la validación se hizo en diferentes versiones y la que en esta investigación se presenta fue realizada en la versión de $CMSSW$ 150.

Una vez obtenida esta reproducción se realizó la primera validación del algoritmo de ajuste GSF.

[1] El código de producción desarrollado en CMSSW, está indicado en una serie de números como 120. El primer número indica una de las series especializada del ciclo, el segundo número uno de los principales lanzamientos con nuevas características, la siguiente con respecto a la anterior, y el tercer número una nueva versión con algunos cambios y correcciones de errores encontrados en las versiones anteriores. Cada lanzamiento especializado esta precedido por la palabra *pre* los cuales son pruebas del código y puede contener algunos errores.

Off-line Vertex Reconstruction Validation: CMSSW 1.2.0

Sample (RelVal 120)	Filter	Eff	σ_xRes[μm]	σ_x Pull	σ_xRes[μm]	σ_x Pull
$H \to ZZ \to 4e$	PTDR	0.969	17	1.36	21	1.13
RelVal Sample	KVF	0.777	22.05	2.13	30.56	1.83
	AVF	0.770	22.63	2.09	31.31	1.74
	TVF	0.766	32.45	2.98	37.50	2.09
$H \to ZZ \to 4\mu$	KVF	0.947	10.77	1.43	23.27	1.65
	AVF	0.947	11.02	1.36	23.38	1.53
	TVF	0.933	12.61	1.48	26.6	1.58

Tabla 6–1: Validación de los algoritmos KVF, AVF y TKF para la reconstrucción de vértices primarios, con el decaimiento $H \to ZZ \to 4e$ y $H \to ZZ \to 4\mu$ en la versión CMSSW 1.2.0

Todos los algoritmos de ajuste para vértices fueron implementados con la clase "VertexFitter", la cual controla todos los pasos del ajuste de vértices, desde la información inicial hasta la información final de las cantidades estimadas. Como tal el "VertexFitter" no produce datos que se pongan nuevamente dentro del evento. Hay un EDAnalyzer[2] y "EDProducer"[3] para esta tarea. Estos son los encargados de leer y dar información, como de crear y almacenar datos respectivamente. Un EDAnalyzer utilizado es el $PrimaryVertexAnalyzer.cc$ (y $PrimaryVertexAnalyzer.h$), los cuales se encuentran en el directorio de src e $interface$ respectivamente. Este par de módulos se encuentran en un paquete de software llamado $Validation/RecoVertex$ del CMSSW[18], con el correspondiente archivo de configuración $ValidateRecoVertex-PrimaryVertex.cfg$, el cual nos da el archivo de salida.

Los datos utilizados para la validación fueron las muestras $H \to ZZ \to 4e^-$ [4] y $H \to ZZ \to 4\mu$. Estas muestras se encuentran en el DBS ("Database Bookkeeping System") [19], el cual contiene la localización de un conjunto de datos de trazas. El navegador del DBS permite explorar conjuntos de datos que han sido avaluados. También permite entender qué datos son los que se necesitan para un sitio en particular y obtener una lista de éstos en un sitio independiente del nombre del archivo conocido como LFN ("Logical File Name"). El producto LFN generalmente empieza por /store y es análogo a un archivo de configuación cmsRun.

[2] El "EDAnalyzer" es un modulo de CMSSW que puede leer un evento y generar alguna información de salida por medio de un modulo de salida.

[3] A un nivel superior, el EDProducer es el que desarrollo y reconstruye las componentes del sistema de trabajo que ejecutan una cantidad de pasos de reconstrucción para crear y almacenar datos en el evento.

[4] $4e$ significa $e^+e^-e^+e^-$

Para realizar la selección de candidatos a vértices primarios, se debe tener presente, como principal característica, que estos vértices sean los más cercanos a los vértices simulados, y para ello se tuvo en cuenta que los algoritmos utilizados, mostraran las características de las siguientes cantidades:

- La resolución o medida de incertidumbre de la posición transversal σ_x y longitudinal σ_z en μm (desviación estándar del ajuste Gausiano del Res x y el Res y) con respecto a la posición de los vértices simulados y reconstruidos en los dos plano.

- La estimación de error dada entre la diferencia de los vértices Reconstruidos y los vértices Simulados, tanto en el eje x como en el eje z. Esta diferencia debe ser en promedio próxima a cero.

$$Res = Rec - Sim \tag{6.1}$$

- Las distribuciones residuales estandarizadas $Pulls\ x$ y $Pulls\ y$ que es la razón dada entre la distribución residual Res x, z y la resolución de las posición σ_x y σ_z de los vértices reconstruidos. El ancho de la distribución Pull debe ser próximo a uno.

$$Pull = \frac{Res}{\sigma_{Rec}} = \frac{Rec - Sim}{\sigma_{Rec}} \tag{6.2}$$

La distribución Residual estandarizada o $Pulls$, son también descritas y ajustadas por distribuciones Gausianas, en donde la gausiana es centrada en cero y la distancia entre la línea trazada en el centro y el punto de inflexión de la curva es igual a el valor de un σ. Cuanto mayor sea σ, más aplanada será la curva de la gausiana.

Las distribuciones residuales $Res\ x, z$ y las distribuciones residuales estandarizadas de los $Pulls\ x, z$ en los diferentes algoritmos de ajuste, para encontrar vértices primarios en el sistema de seguimiento, se resumen en las tablas 6–2 y en 6–3.

En la tabla 6–2 se puede observar que el mejor de los ajustes utilizados para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^-$ fue el GSF. Al comparar los datos obtenidos con el reporte hecho en el PTDR, ("Physics Technical Design Report"), se encontró que el error estimado del $Res\ x$ y el $Pull\ x$ disminuyo en un 0.410 μm y un 0.141 respectivamente, mientras que el $Res\ z$ y el $Pull\ z$ aunque se muestra mejor que en los otros algoritmos no lo son respecto a lo publicado, pues aumentaron en un 3.294 y un 0.32 respectivamente.
Observando los diversos filtros para el mismo decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^-$, se puede notar que el ajuste no lineal AVF da mejores resultados que el ajuste lineal KVF, en lo referente a la estimación de error de los $Res\ x$ y $Pull\ x$, $Pull\ z$. El TKF presenta incrementos bastante notorios con respecto a los otros ajustes, este algoritmo es avaluable pero necesita ser optimizado.

Para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$, los datos obtenidos y registrados en la tabla 6–3, muestra que el mejor ajuste está dado por AVF para el $Res\ x$, $Pull\ x$, y el $Pull\ z$. Para el $Res\ z$ el incremento fue de 0.16 frente al ajuste más utilizado KVF.

$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^-$	ResX(μm)	ResZ(μm)	PullX	PullZ	eff
PTDR	17	21	1.36	1.13	0.969
KVF	33.053	30.570	3.027	1.673	0.834
AVF	29.211	30.863	2.566	1.515	0.763
TKF	36.728	36.519	3.391	1.807	0.790
GSF	16.590	24.294	1.219	1.450	0.847

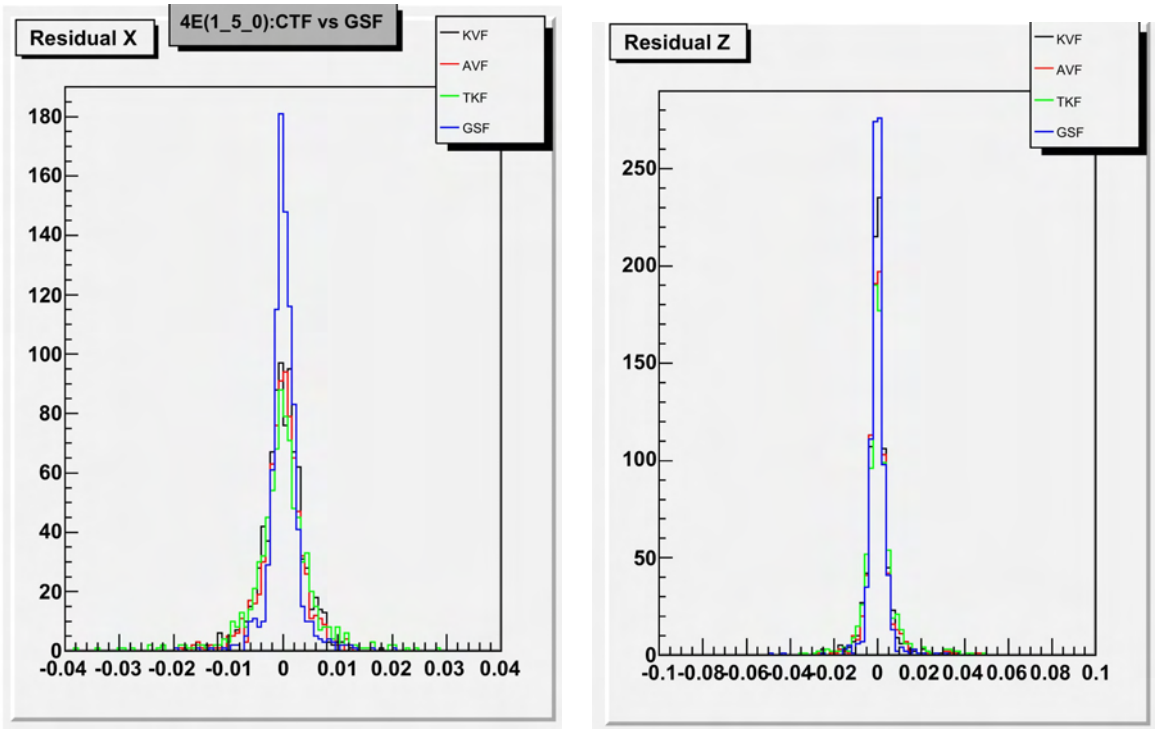
Tabla 6–2: *Validación de los algoritmos KVF, AVF, TKF y GSF para la reconstrucción de vértices primarios, con el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^-$ en la versión CMSSW 1.5.0*

Se muestra además mejor eficiencia. El *Res z* en este decaimiento fue mejorado por el filtro del KVF.

$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$	ResX(μm)	ResZ(μm)	PullX	PullZ	eff
KVF	10.264	21.234	1.202	1.217	0.955
AVF	10.187	21.394	1.125	1.180	0.957
TKF	10.828	21.751	1.215	1.222	0.955
GSF	14.149	22.627	1.229	1.498	0.883

Tabla 6–3: *Validación de los algoritmos KVF, AVF, TKF y GSF para la reconstrucción de vértices primarios, con los decaimientos $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$ en la versión CMSSW 1.5.0*

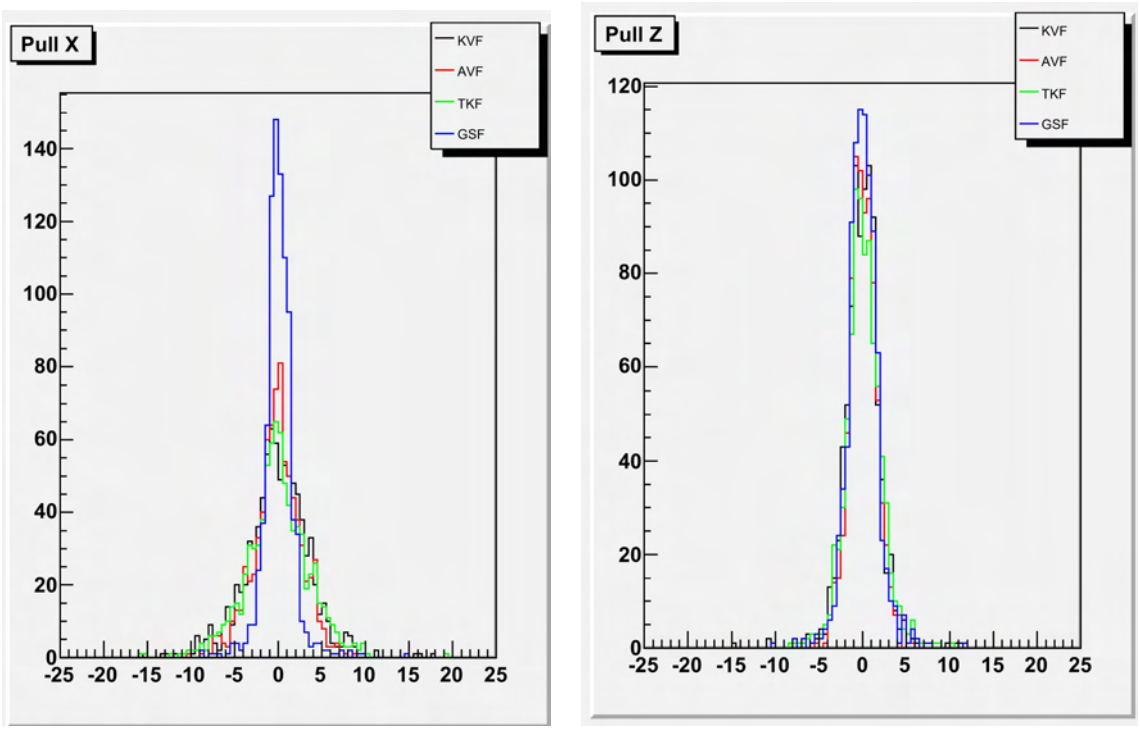
Las siguientes gráficas muestran una comparación de las distribuciones residuales *Res X*, *Res Z*, y las distribuciones residuales estandarizadas *Pull X*, *Pull Z* de los diferentes algoritmos, para los decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^-$ y $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$. Los algoritmos KVF, AVF y TKF fueron generados con trazas regulares CTF, mientras que el GSF tiene trazas GsfTrack.



(a) Distribución Residual *Res X* .

(b) Distribución Residual *Res Z* .

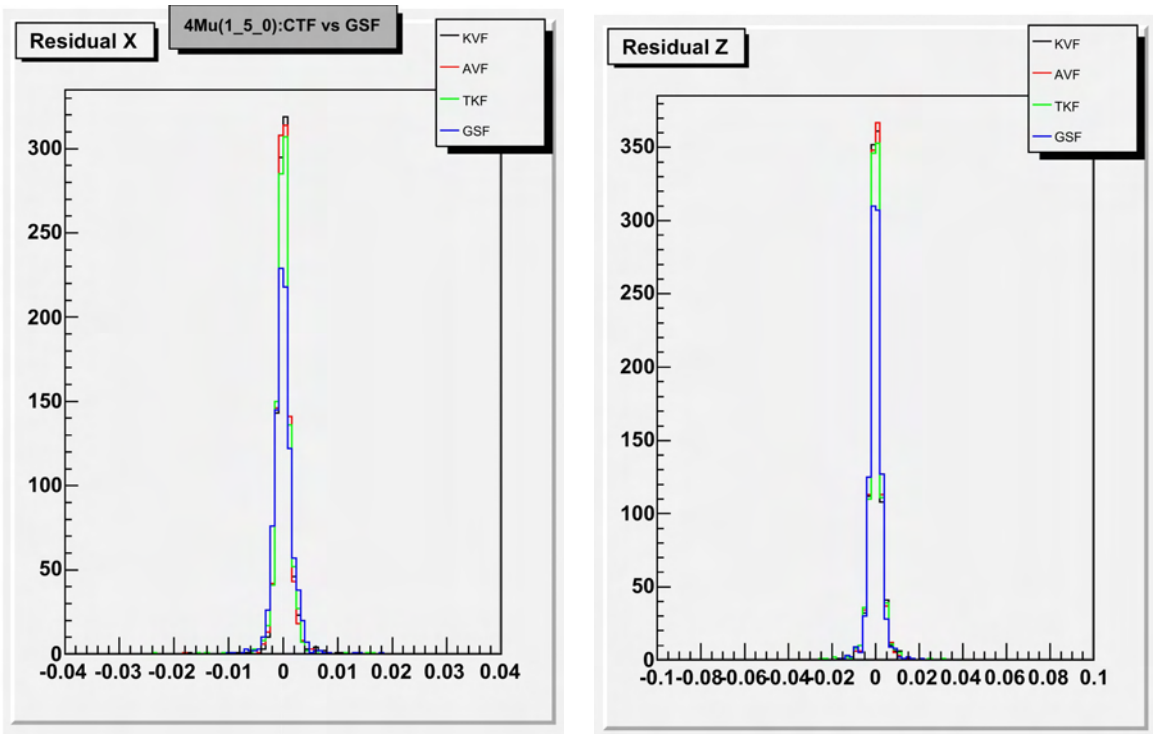
Figura 6–1: Comparación en los diferentes ajustes del *Res X* y *Res Z* para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^{-}$.



(a) Distribución residual estandarizada *Pull X* .

(b) Distribución residual estandarizada *Pull Z*.

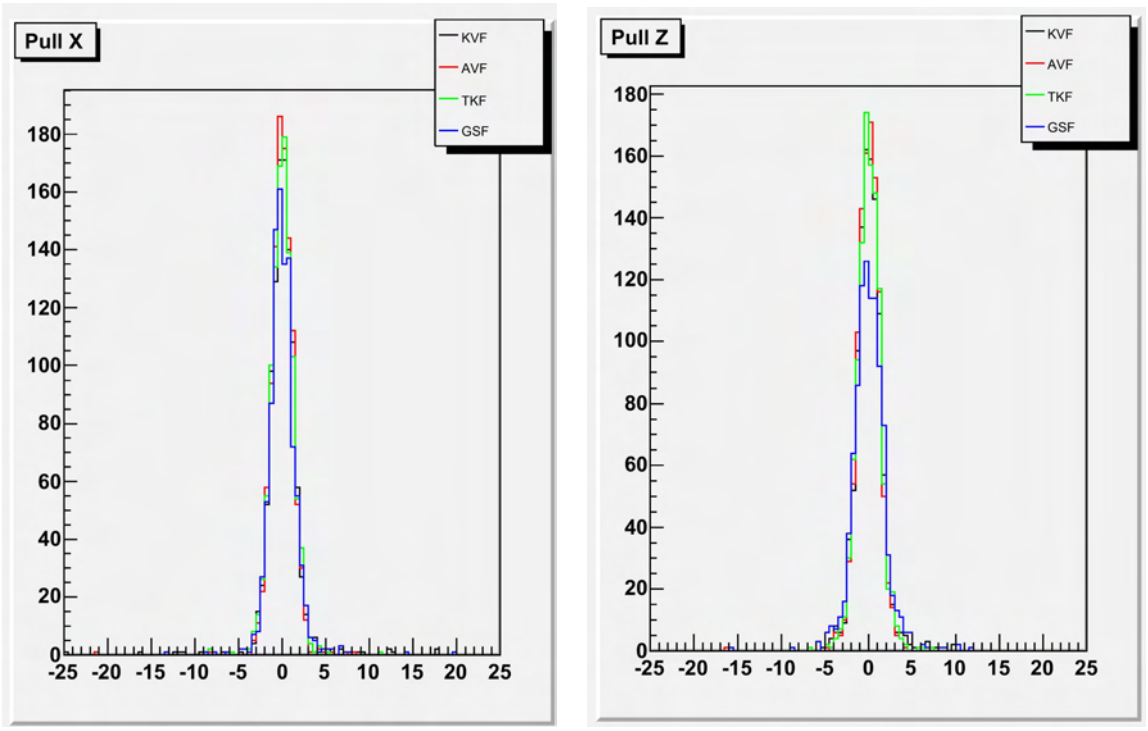
Figura 6–2: Comparación en los diferentes ajustes del *Pull X* y *Pull Z* para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^{-}$.



(a) Distribución Residual *Res X*.

(b) Distribución Residual *Res Z*.

Figura 6–3: Comparación en los diferentes ajustes del *Res X* y *Res Z* para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$.



(a) Distribución residual estandarizada *Pull X*.

(b) Distribución residual estandarizada *Pull Z*.

Figura 6–4: Comparación en los diferentes ajustes del *Pull X* y *Pull Z* para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En esta tesis la validación de los diferentes algoritmos de ajuste para la reconstrucción de vértices primarios, en los decaimientos $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^{-}$ y $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$ se ha investigado. Se ha estudiado, analizado y utilizado la simulación del detector de CMS para optimizar dichos algoritmos. Para ésta validación los datos tomados de la simulación fueron sin "Pile up".

En la ejecución de una serie de procesos para aplicar los diferentes ajustes en las dos muestras estudiadas se ve que para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^{-}$ el filtro del GSF da una mejor resolución en la reconstrucción de vértices primarios, específicamente para la distribución residual $Res\ x$ y la distribución residual estandarizada $Pull\ x$. Esta óptima resolución es debido a que el algoritmo GSF presenta variaciones más pequeñas para las distribuciones de error conocidas comúnmente como las colas, los cuales son determinadas como no-Gausianas. Este algoritmo es particularmente benéficioso para la reconstrucción de los electrones e^{-}, ya que la pérdida de energía del electrón, a través del sistema de seguimiento, no es totalmente gausiana, esto debido a que la energía depositada en el calorímetro electromagnético presenta el patrón de emisión de fotones de Bremsstrahlung[1] en el sistema de seguimiento.

Los datos obtenidos en la distribución residual Res y distribución residual estandarizada $Pull$ en el plano longitudinal Z son influenciados por el desalineamiento

[1] Bremsstrahlung corresponde al proceso de pérdida de energía de las partículas cargadas cuando viajan a través de un material. Las partículas cargadas generan radiactividad cuando son aceleradas por campos magnéticos.

del sistema de seguimiento en CMS. Este desalineamiento es debido a el desplazamiento de los sensores de silicio de sus posiciones previstas, lo cual es una de las situaciones que genera mayor incertidumbre en la validación de los algoritmos de ajuste. Este desplazamiento de los módulos del detector se está tratando de solucionar implementando la simulación del detector. El desalineamiento se manifiesta desde el primer paso de la reconstrucción de las trazas, a partir de los impactos reconstruidos en los sensores del sistema de seguimiento, pues estos son generados según la geometría ideal del detector.

Otra parte importante que influye en los datos mostrados en esta validación y que se debe tener en cuenta en el análisis de los resultados, es que la resolución en el plano tranverso x, es en μm, la cúal favorece bastante los datos obtenidos. Contrario a los datos obtenidos en el plano longitudinal z pues la resolución está dada en cm.

También, se puede percibir que el ajuste AVF da una mejor resolución en el Res x, el $Pull$ x y el $Pull$ z que el ajuste utilizado convencionalmente KVF, para los dos decaimientos estudiados $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^{-}$ y $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$. Lo anterior se atañe a la habilidad que presenta el ajuste AVF de descartar trazas de bajo peso, lo cual mejora la estimación del cálculo de error en la reconstrucción de vértices primarios. Es notable una mejor resolución frente al algoritmo comúnmente utilizado KVF. No obstante no podemos mencionar lo mismo para el Res z que presenta una distribución de error un tanto alta.

También se observa que el registro dado por los $Pull$, tanto en x como en z, para las dos muestras utilizadas, y en los diferentes algoritmos de ajuste, tuvieron un σ_{Rec} subestimado. Esta subestimación es debido a que los $Pulls$ dieron valores mayores que 1. Situación que se agudiza en los $Pull$ x de los ajustes KVF, AVF y TKF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^{-}$, siendo mayor que los $Pull$ x de los muones, debido a que estos algoritmos no tienen en cuenta el proceso de pérdida de energía de Bremsstrahlung.

Es de resaltar que al reproducir los resultados obtenidos en la validación de los algoritmos de ajuste KVF, AVF, y TKF para la muestra $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$, mejoró los Res x, z, los $Pulls$ x, z y la eff con respecto a la validación que ya se había realizado y se muestra comparando la tabla 6–1 y la tabla 6–3.

Se esperaba que el GSF desmejorara para la muestra $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$. Este desmejoramiento se debe a que el GSF con trazas GsfTrack por defecto, es un algoritmo que tiene la información de la pérdida de energía de los electrones. Este desmejoramiento se puede ver en la tabla 6–3.

Se espera poder optimizar los diferentes algoritmos de ajuste, en especial el GSF, en los Res z y $Pull$ z y mejorar la resolución de la validación de los datos obtenidos en este trabajo de investigación.

7.1 TRABAJOS FUTUROS

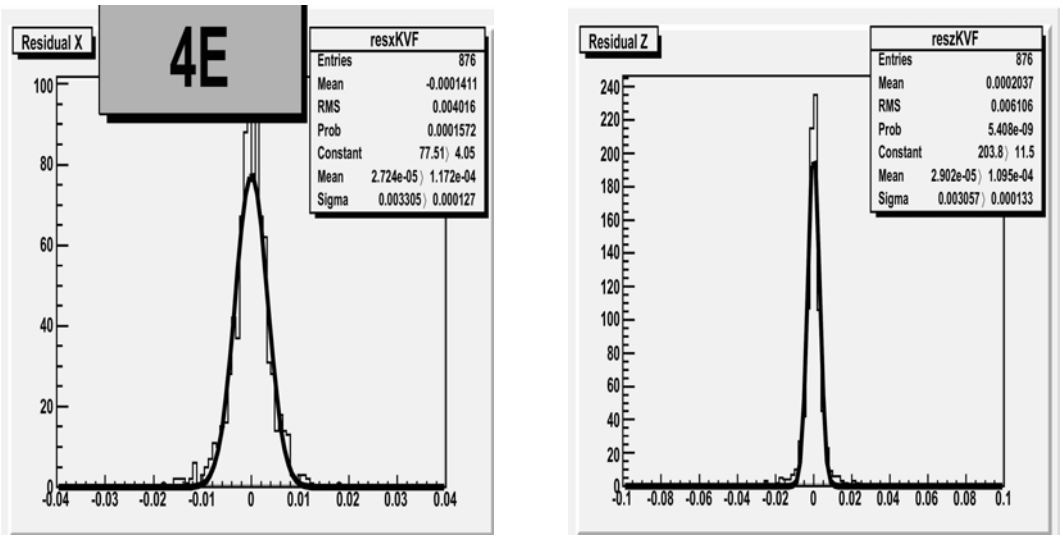
Como trabajo futuro un nuevo algoritmo de ajuste se está evaluando en este momento en CMS, el TVF. Actualmente se encuentra en mantenimiento para su optimización. Este algoritmo de ajuste es administrado por el Doctor Eduardo Rámirez y el estudiante graduado Miguel Bonnett del grupo de Física de altas energías de la Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez.

APENDICES

APENDICE A

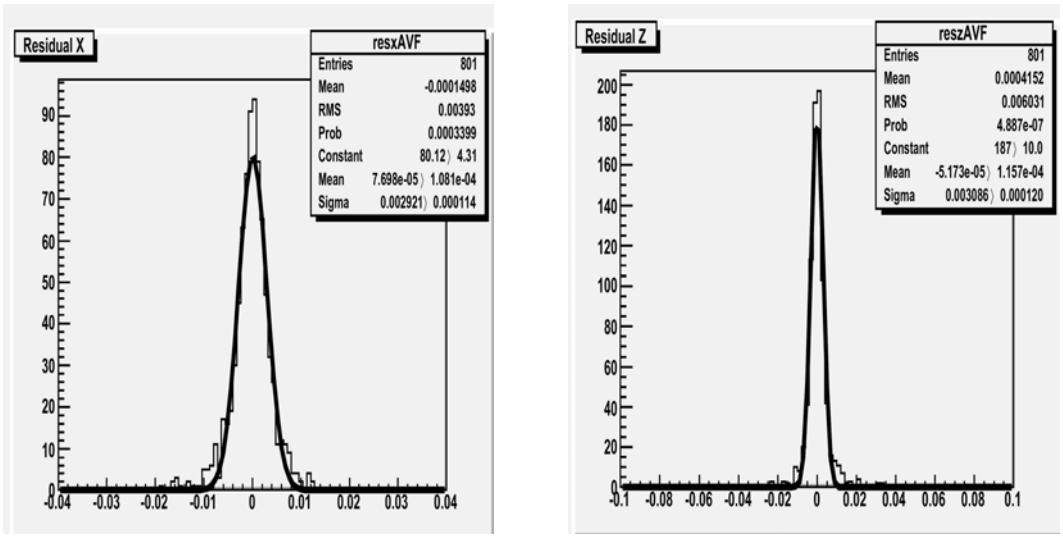
GRÁFICAS

Ésta parte del trabajo contiene las gráficas que se obtuvieron en el desarrollo de la validación de los algoritmos de ajuste KVF, AVF, TKF y GSF para la reconstrucción de vértices en la versión $CMSSW$ 150, con las muestras $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^{-}$ y $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$. Estos datos se encuentran condensados en las tablas 6–2 y 6–3. La información en los cuadros de las gráficas hacen referencia a: El número de entradas por cada corrida (Entries). La media ("Mean") tanto del histograma como de la gausiana. El RMS "root mean square", media cuadrática o valor eficaz, y el Sigma, el cúal indica valor del Res tanto transversal como longitudinal en cm.



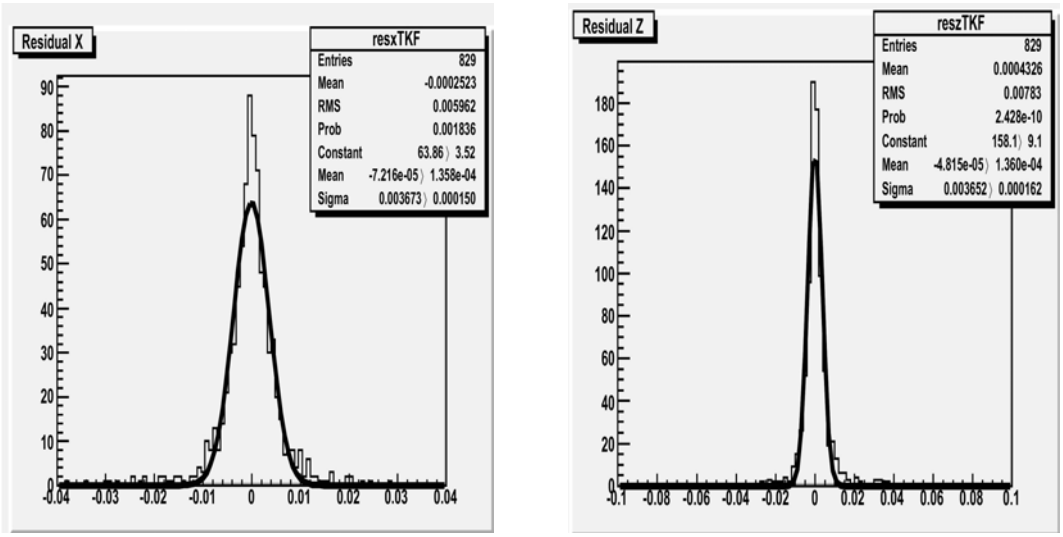
a) b)

Figura A–1: Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual Res x y z con el filtro KVF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^{-}$.



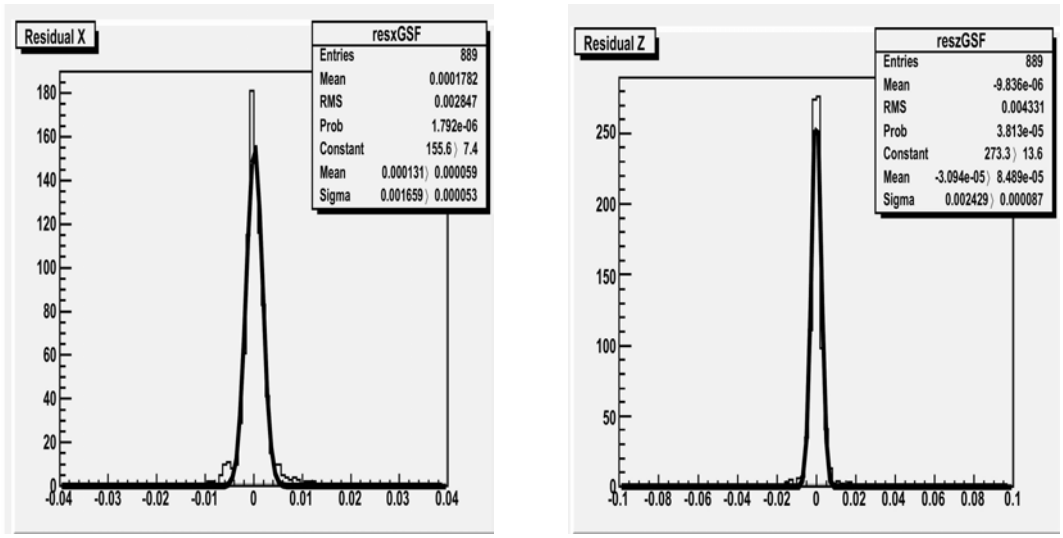
a) b)

Figura A–2: Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual Res x y z con el filtro AVF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^{-}$.



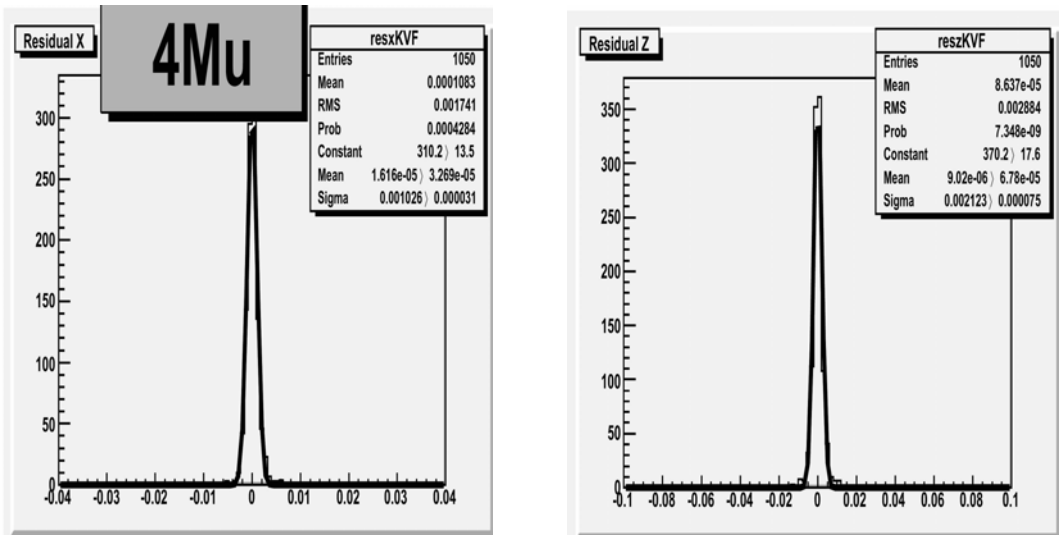
a) b)

Figura A–3: Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual Res x y z con el filtro TKF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^{-}$.



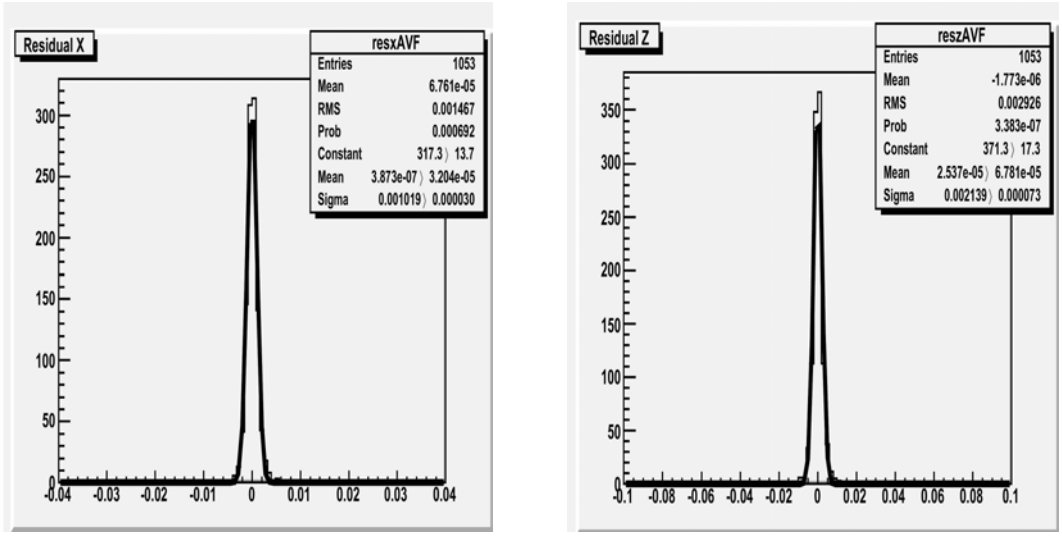
a) b)

Figura A–4: Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual Res x y z con el filtro GSF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^{-}$.



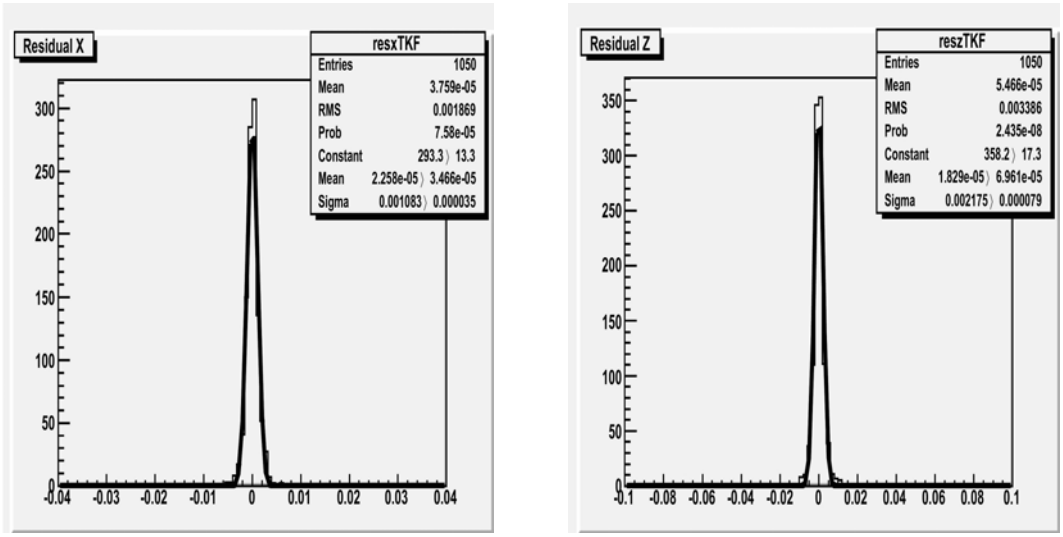
a) b)

Figura A–5: Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual Res x y z con el filtro KVF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$.



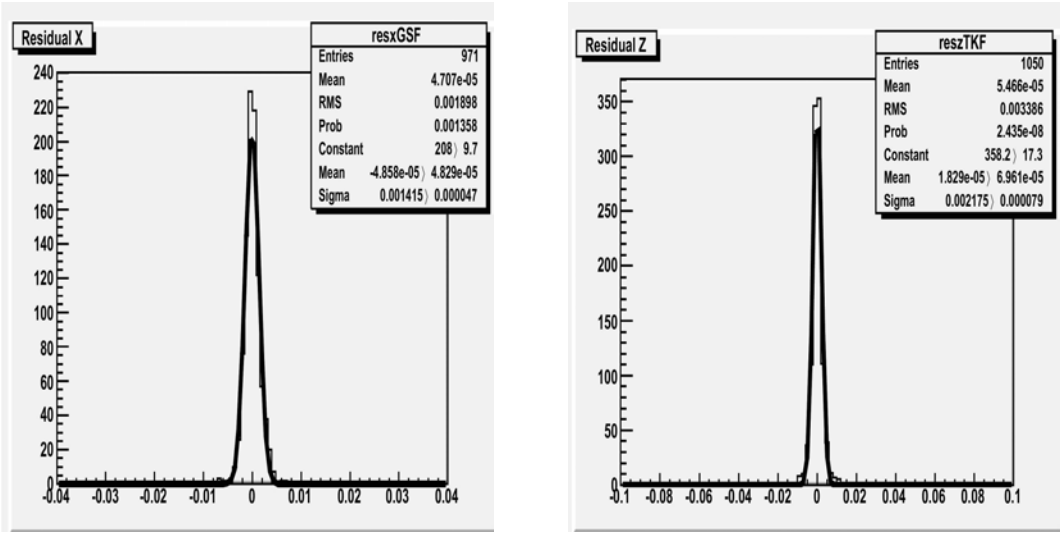
a) b)

Figura A–6: Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual Res x y z con el filtro AVF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$.



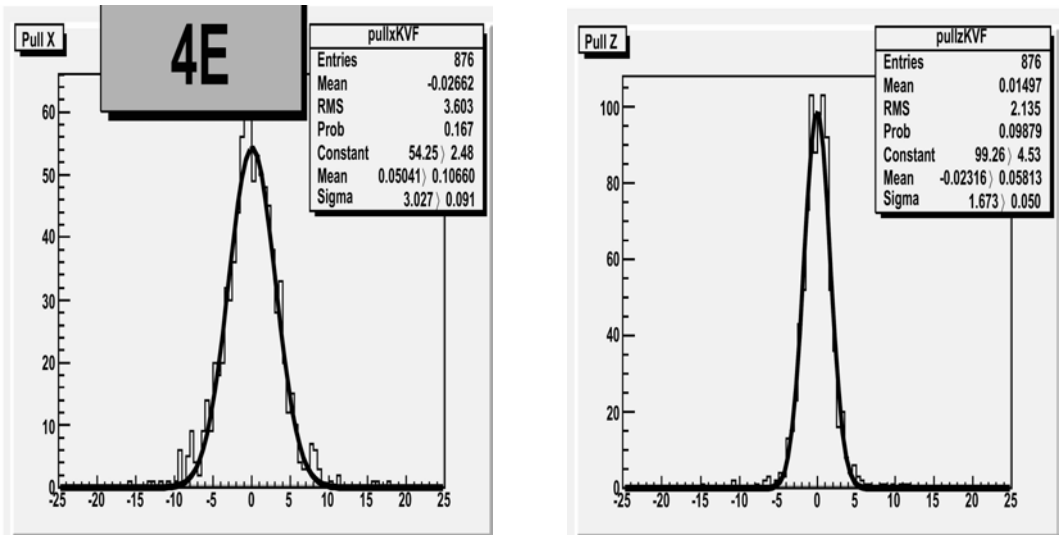
a) b)

Figura A–7: Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual Res x y z con el filtro TKF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$.



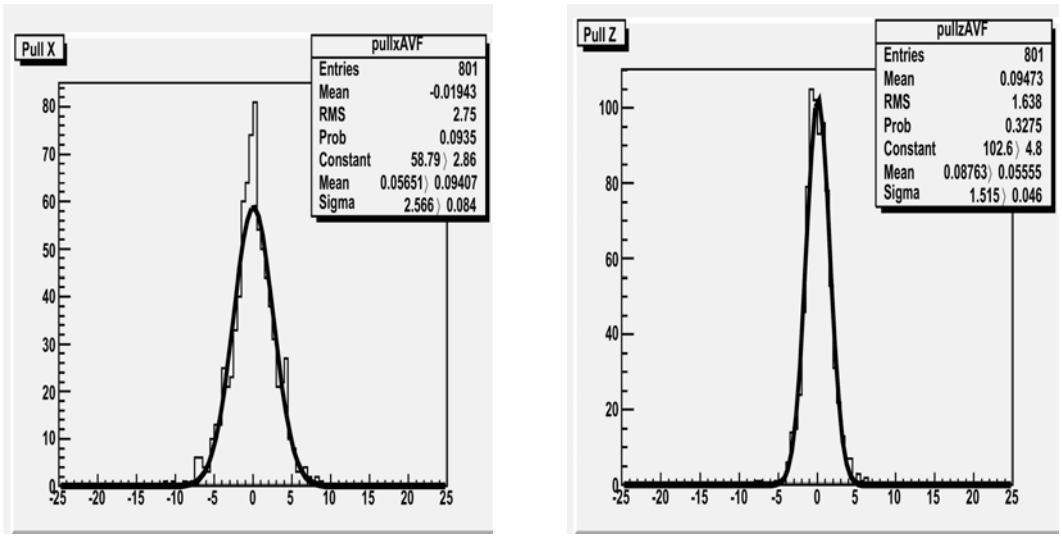
a) b)

Figura A–8: Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual Res x y z con el filtro GSF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$.



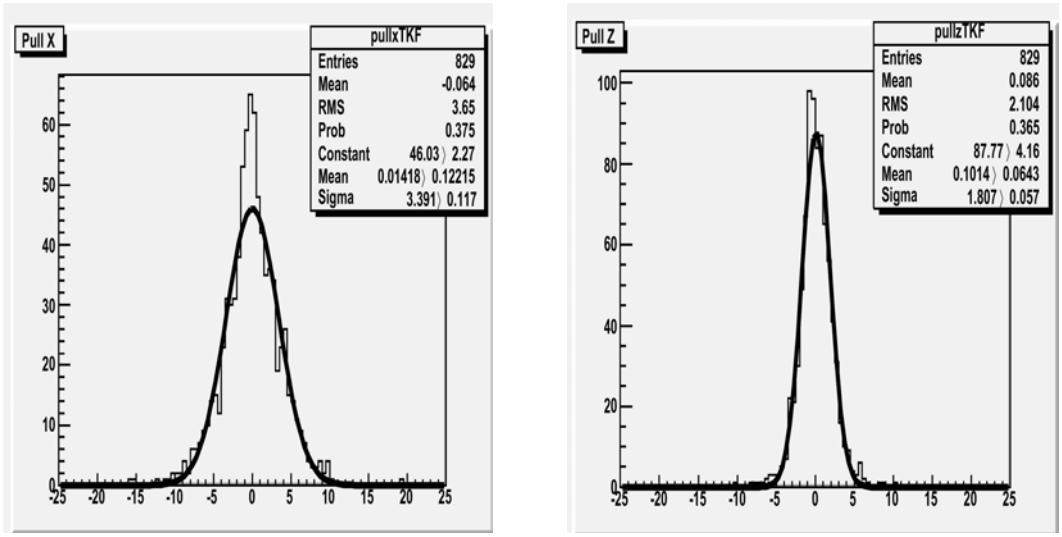
a) b)

Figura A–9: Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual *Pull* x y z con el filtro KVF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^{-}$.



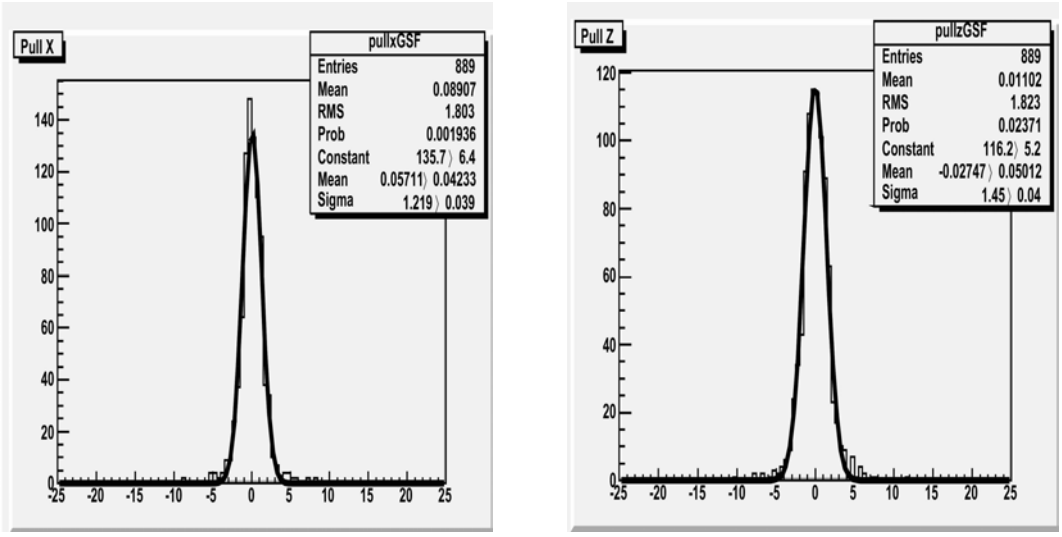
a) b)

Figura A–10: Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual *Pull* x y z con el filtro AVF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^{-}$.



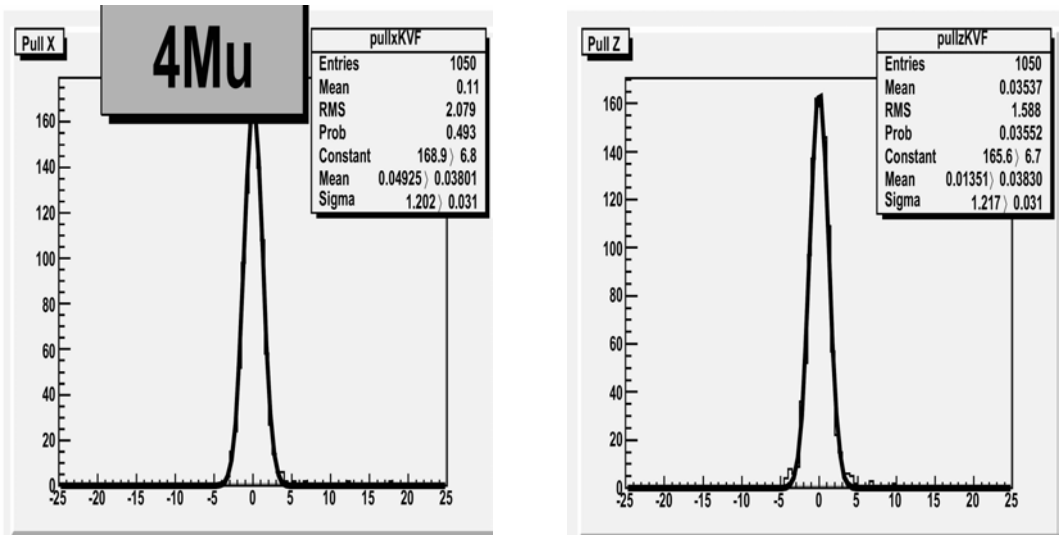
a) b)

Figura A–11: Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual *Pull* x y z con el filtro TKF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^{-}$.



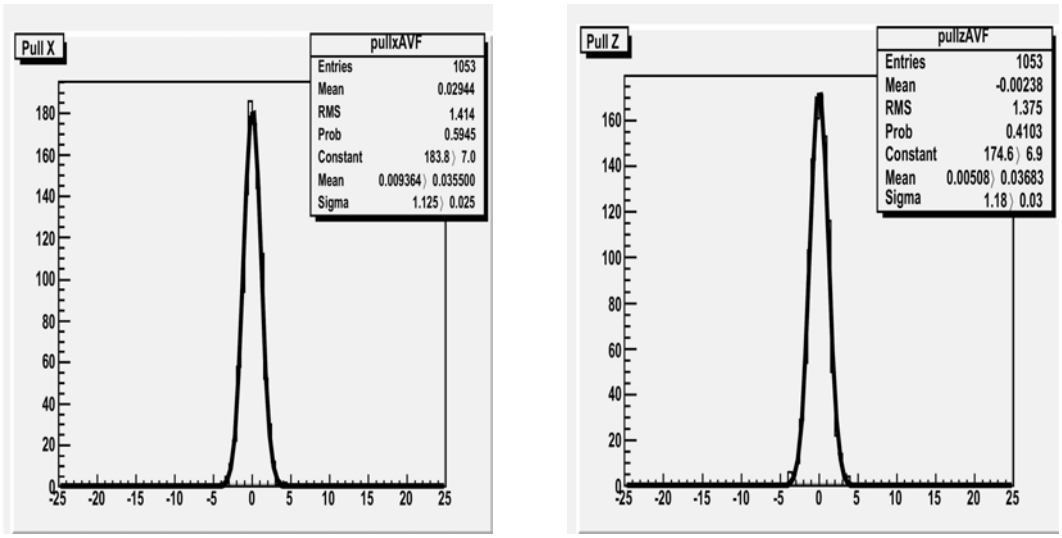
a) b)

Figura A–12: Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual *Pull* x y z con el filtro GSF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e^{-}$.



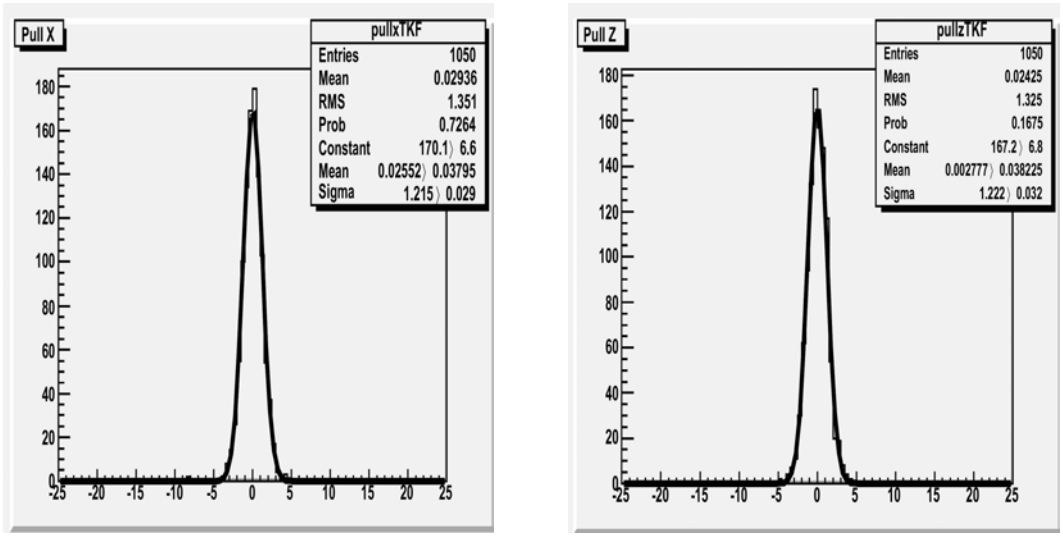
a) b)

Figura A–13: Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual *Pull* x y z con el filtro KVF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$.



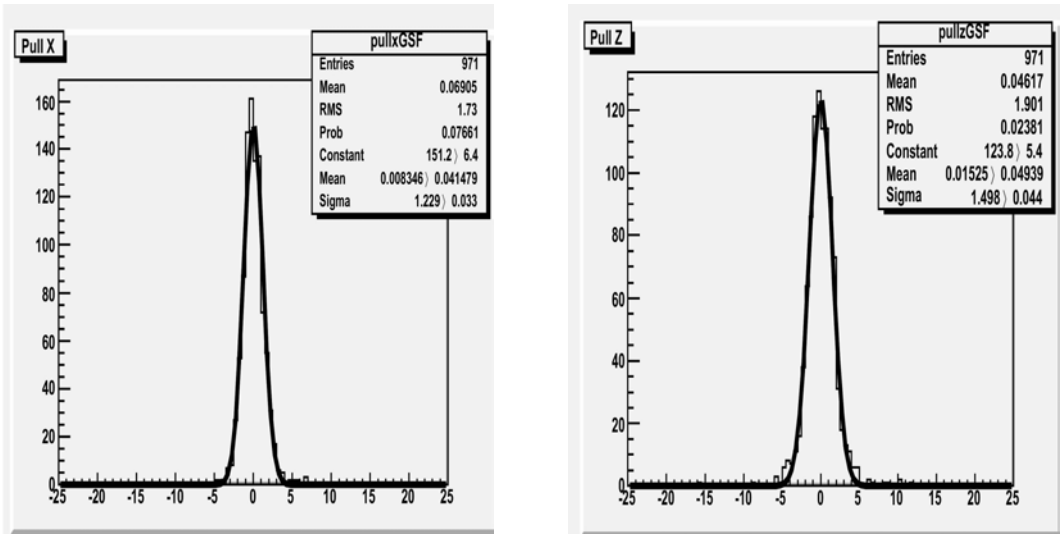
a) b)

Figura A–14: Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual *Pull* x y z con el filtro AVF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$.



a) b)

Figura A–15: Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual *Pull* x y z con el filtro TKF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$.



a) b)

Figura A–16: Reconstrucción de vértices primarios: Distribución residual *Pull* x y z con el filtro GSF para el decaimiento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] David Griffiths. Introduction To Elementary Particles. Wiley, 1987.

[2] Jonathan L. Rosner. The Standard Model in 2001. Enrico Fermi Institute and Department of Physics. University of Chicago, 2002.

[3] CMS. Detector Performance and Software. Physics Technical Design Report, Vol. II.

[4] The LEP Electroweak Working Group. http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/

[5] Reviews of Modern Physics, Vol. 71, No. 2, Centenary 1999.

[6] M. Aldaya *et al*, CMS Analysis Note, Determination of the mass, cross section, and width of the Standard Model Higgs boson using the $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\mu$ decay channel, April 26, 2006.

[7] CMS. Detector Performance and Software. Physics Technical Design Report Vol. I.

[8] Christian Piasecki. Development of the CMS Tracker and Reconstruction of Secondary Vertices of b- and c-Hadrons. Dissertation. Ph.D. Thesis, University of Karlsruhe, 2006.

[9] S. Cucciarelli *et al*, Track reconstruction, primary vertex finding and seed generation with the Pixel Detector, CMS NOTE 2006/026.

[10] Th. Speer *et al*, Track reconstruction in the CMS tracker, CMS NOTE-2006/041.

[11] P. Kubinec *et al*, Vertex reconstruction and track bundling at the LEP collider using robust algorithms, Comput. Phys. Commun. 96 (1996) 189-208.

[12] T.Speer *et al*, Vertex fitting in the CMS Tracker, CMS NOTE-2006/032

[13] T. Speer, K. Prokofiev, Vertex fitting with the Kalman filter formalism in the ORCA reconstruction program, CMS IN 2003/008.

[14] R. Fruhwirth,W. Waltenberger, Adaptive Vertex Fitting, CMS NOTE 2007/008.

[15] A Gaussian-sum filter for vertex reconstruction. R. Fruhwirth, Institute for High-Energy Physics. T. Speer, Institute of Physics of University Zurich. 2004.

[16] R. Fruhwirth,Institut fur Hochenergiephysik der Osterreichischen Akademie der Wissenschaften. Are Strandlie, Department of Physics, University of Oslo. Track finding and fitting with the Gaussian-sum filter.

[17] http://cmssw.cvs.cern.ch/cgi-bin/cmssw.cgi/

[18] http://cmssw.cvs.cern.ch/cgi-bin/cmssw.cgi/CMSSW/Validation/RecoVertex/

[19] http://cmsdbs.cern.ch/DBS2-discovery/