

**IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DEL AJUSTE DE RECORTE  
Y DE UN SELECTOR DE TRAZAS CONFIABLES PARA LA  
RECONSTRUCCIÓN DE VÉRTICES PRIMARIOS DEL  
EXPERIMENTO CMS**

Por

Miguel Reinaldo Bonnett Del Alamo

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

2008

Aprobada por:

---

Pablo J Marrero, Ph.D.  
Miembro, Comité Graduado

---

Fecha

---

Esov Velázquez, Ph.D.  
Miembro, Comité Graduado

---

Fecha

---

Juan Eduardo Ramírez, Ph.D.  
Presidente, Comité Graduado

---

Fecha

---

Uroyoán R. Walker Ramos, Ph.D.  
Representante de Estudios Graduados

---

Fecha

---

Héctor Jiménez, Ph.D.  
Director del Departamento

---

Fecha

Abstract of Disertación Presented to the Graduate School  
of the University of Puerto Rico in Partial Fulfillment of the  
Requirements for the Degree of Master of Science

**IMPLEMENTATION, AND VALIDATION OF THE TRIMMED  
VERTEX FITTER, AND TRACK QUALITY USED IN PRIMARY  
VERTEX RECONSTRUCTION FOR THE CMS EXPERIMENT**

By

Miguel Reinaldo Bonnett Del Alamo

May 2008

Chair: Juan Eduardo Ramírez

Major Department: Physic

The objective of the CMS experiment is to find new particles based on proton-proton collisions. In order to find these new particles it is necessary to determine their interaction point. This is realized using vertex reconstruction. This work shows a robust method for reconstructing primary vertices which serves as an alternative to the one used by default in the CMS experiment. The other work done was an optimization of track quality in primary vertex reconstruction.

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

**IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DEL AJUSTE DE RECORTE  
Y DE UN SELECTOR DE TRAZAS CONFIABLES PARA LA  
RECONSTRUCCIÓN DE VÉRTICES PRIMARIOS DEL  
EXPERIMENTO CMS**

Por

Miguel Reinaldo Bonnett Del Alamo

Mayo 2008

Consejero: Juan Eduardo Ramírez  
Departamento: Física

El experimento CMS tiene por objetivo encontrar nuevas partículas a partir de la colisión protón-protón. Para encontrar estas nuevas partículas, es necesario determinar el punto de interacción de éstas. La forma de encontrar este punto se logra a través de la reconstrucción de vértices. Los propósitos de este trabajo son mostrar un método robusto de reconstrucción de vértices primarios alternativo al usado por defecto en el experimento CMS. Por otro lado, se ha optimizado el filtro usado en la selección de trazas para la reconstrucción de vértices primarios.

Copyright © 2008

por

Miguel Reinaldo Bonnett Del Alamo

*Este trabajo ésta dedicado a mis seres queridos.*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por el apoyo que me brindaron para llegar acá. Así como a todas las personas que me apoyaron y orientaron en el trabajo de investigación.

## TABLA DE CONTENIDO

		<u>página</u>
ABSTRACT ENGLISH	.....	ii
RESUMEN EN ESPAÑOL	.....	iii
AGRADECIMIENTOS	.....	vi
LISTA DE TABLAS	.....	ix
LISTA DE FIGURAS	.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS	.....	xii
1	Introducción y Objetivos	1
2	LHC Y CMS	3
2.1	Modelo Estándar	3
2.2	El Bosón de Higgs	6
2.3	LHC	8
2.4	CMS	11
2.5	Física del Bosón de Higgs en el acelerador LHC	14
3	Reconstrucción de Vértices Primarios en CMS	17
3.1	Definiciones Técnicas	17
3.2	El sistema Interior de Detección de Trazas (“Inner Tracker”)	18
3.3	Reconstrucción de Trazas	19
3.4	Parámetros de la Traza	20
3.5	Reconstrucción de Vértices	21
3.6	Ajustes para la Reconstrucción de Vértices	23
3.6.1	Ajuste Kalman	25
3.6.2	Ajuste Adaptable “ <i>Adaptive</i> ”	26
3.6.3	Ajuste de Recorte (“ <i>Trimmed</i> ”)	27
3.6.4	Ajuste de Suma de Gaussianas “ <i>GaussianSum</i> ”	28
3.6.5	Ajuste de Suma de Gaussianas Adaptable “ <i>AdaptiveGaussianSum</i> ”	29
4	Descripción del Trabajo Realizado para la Reconstrucción de Vértices Primarios en CMS	30

4.1	Implementación del Ajuste “ <i>Trimmed</i> ” para Vértices Primarios (TVF) . . . . .	30
4.2	Optimización del Filtro de Selección de Trazas Confiables (“Track Quality”) para Vértices Primarios . . . . .	31
5	Resultados . . . . .	34
6	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS . . . . .	49
6.1	Conclusiones . . . . .	49
6.2	Trabajos Futuros . . . . .	50
	APÉNDICES . . . . .	51
A	Código de la Implementación del “ <i>Track Quality</i> ” . . . . .	52



LISTA DE TABLAS

<u>Tabla</u>		<u>página</u>
2-1	Partículas fundamentales del Modelo Estándar . . . . .	5
2-2	Interacciones descritas por el Modelo Estándar junto con los grupos gauge y los bosones asociados a cada una de ellas. En la última columna de la derecha se representan las constantes fundamentales que indican la intensidad relativa de cada interacción . . . . .	6
5-1	Validación de los algoritmos KVF, AVF y TVF con los decaimientos $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ , $BJet50 - 120GeV$ y $CJet50 - 120GeV$ para la versión CMSSW 1.6.0 . . . . .	38
5-2	Validación de los algoritmos KVF, AVF y TVF con los decaimientos $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ , $BJet50 - 120GeV$ y $CJet50 - 120GeV$ aplicando el TQ con $minpt > 0$ para la versión CMSSW 1.6.0 . . . . .	39
5-3	Validación de los algoritmos KVF, AVF y TVF con los decaimientos $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ , $BJet50 - 120GeV$ y $CJet50 - 120GeV$ aplicando el TQ con $minpt > 1$ para la versión CMSSW 1.6.0 . . . . .	40
5-4	Validación de los algoritmos KVF, AVF y TVF con los decaimientos $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ , $BJet50 - 120GeV$ y $CJet50 - 120GeV$ aplicando el TQ con $minpt > 4$ para la versión CMSSW 1.6.0 . . . . .	40

## LISTA DE FIGURAS

Figura	página
2-1 Sistema de aceleradores de CERN. . . . .	9
2-2 Dipolos del LHC. . . . .	10
2-3 Disposición de los experimentos ALICE, LHCb, ATLAS y CMS en el LHC. . . . .	11
2-4 Esquema del detector CMS. . . . .	13
2-5 Interacciones de las partículas en el detector CMS. . . . .	13
2-6 A la izquierda se encuentran los diagramas de Feynman de los principales mecanismos de producción del Bosón de Higgs en la colisión protón-protón. $gg \rightarrow H$ , $qq \rightarrow qqH$ , $gg \rightarrow tt^*H$ , $qq^* \rightarrow W, ZH$ . A la derecha se muestra la sección eficaz de producción del Bosón de Higgs en función de $m_H$ . . . . .	14
2-7 Fracción de desintegración del Bosón de Higgs en función de $m_H$ . . . . .	15
3-1 Parámetros de las trazas en 2D . . . . .	21
3-2 Esquema de los distintos vértices en una cadena de decaimiento $b - c$ . . . . .	22
3-3 Parámetros de perigee. . . . .	25
3-4 Función de peso $w_i$ para tres valores distintos de T. . . . .	27
5-1 Distribución residual. . . . .	35
5-2 Distribución <i>Pull</i> . . . . .	36
5-3 Histogramas del Resx y Pullx para $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l, BJet50 - 120GeV$ y $CJet50 - 120GeV$ con los distintos ajustes KVF, AVF y TVF. . . . .	41
5-4 Histogramas del Resz y Pullz para $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l, BJet50 - 120GeV$ y $CJet50 - 120GeV$ con los distintos ajustes KVF, AVF y TVF. . . . .	42
5-5 Histogramas del Resx y Pullx para $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l, BJet50 - 120GeV$ y $CJet50 - 120GeV$ con los distintos ajustes KVF, AVF y TVF aplicando un TQ con $minpt > 0$ para la versión CMSSW 1.6.0. . . . .	43

5-6	Histogramas del Resz y Pullz para $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l, BJet50 - 120GeV$ y $CJet50 - 120GeV$ con los distintos ajustes KVF, AVF y TVF aplicando un TQ con $minpt > 0$ para la versión CMSSW 1.6.0. . .	44
5-7	Histogramas del Resx y Pullx para $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l, BJet50 - 120GeV$ y $CJet50 - 120GeV$ con los distintos ajustes KVF, AVF y TVF aplicando un TQ con $minpt > 1$ para la versión CMSSW 1.6.0. . .	45
5-8	Histogramas del Resz y Pullz para $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l, BJet50 - 120GeV$ y $CJet50 - 120GeV$ con los distintos ajustes KVF, AVF y TVF aplicando un TQ con $minpt > 1$ para la versión CMSSW 1.6.0. . .	46
5-9	Histogramas del Resx y Pullx para $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l, BJet50 - 120GeV$ y $CJet50 - 120GeV$ con los distintos ajustes KVF, AVF y TVF aplicando un TQ con $minpt > 4$ para la versión CMSSW 1.6.0. . .	47
5-10	Histogramas del Resz y Pullz para $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l, BJet50 - 120GeV$ y $CJet50 - 120GeV$ con los distintos ajustes KVF, AVF y TVF aplicando un TQ con $minpt > 4$ para la versión CMSSW 1.6.0. . .	48

## LISTA DE ABREVIATURAS

ALICE	A Large Ion Collider Experiment.
ATLAS	A Toroidal LHC Apparatus.
ECAL	Electromagnetic Calorimeter.
CERN	European Organization for Nuclear Research.
CMS	Compact Muon Solenoid.
HCAL	Hadron Calorimeter.
LHC	Large Hadron Collider.
LHCb	Large Hadron Collider beauty.
LINAC	Linear Accelerator.
PS	Proton Synchrotron.
PSB	Proton Synchrotron Booster.
QCD	Quantum Chromo Dynamics.
SPS	Super Proton Synchrotron.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En el experimento CMS (*“Compact Muon Solenoid”*) del acelerador LHC (*“Large Hadron Collider”*) colisionará protones a una energía de 14  $TeV$  en el centro de masa. El objetivo del LHC es profundizar en el estudio de la estructura de la materia, recreando las condiciones que existieron en el Universo cuando tan sólo habían transcurrido  $10^{-12}$  *segundos* después del *“Big Bang”*. CMS tiene como una de sus finalidades encontrar el bosón de Higgs, partícula propuesta en el Modelo Estándar pero de la cual todavía no se tiene ninguna evidencia experimental; dicha partícula da origen a la masa de las partículas elementales, y a la diferencia en masa entre el fotón (sin masa) y los bosones  $W$  y  $Z$  (relativamente masivos).

Al colisionar haces de partículas, como los protones, aparecen nuevas partículas, siendo necesario estimar el punto de interacción de las partículas producidas por la colisión. Esto se logra a través de la reconstrucción de vértices a partir de las trazas dejadas por las partículas cargadas. Los ajustes hechos a la reconstrucción por lo general se hacen por el método de los mínimos cuadrados. Sin embargo, los parámetros de las trazas y sus errores suelen presentar imperfecciones en sus estimaciones causadas por la interacción con el material del detector y la resolución del mismo, haciendo difícil determinar el vértice para partículas de vida corta. Para solucionar este problema se usan métodos robustos. Por otro lado, si se quiere mejorar la reconstrucción del vértice se realiza una selección de trazas confiables a través

de un filtro en el algoritmo de reconstrucción.

Los objetivos de esta tesis son dos. El primero es la implementación y validación de un método robusto para la reconstrucción de vértices en CMS conocido como “*Trimmed Vertex Fitter*”. El segundo es la búsqueda de cortes óptimos para la selección de trazas confiables en la reconstrucción de vértices primarios.

Este escrito se divide en seis capítulos. En el capítulo 2 se da una descripción del modelo estándar, el bosón de Higgs, una visión general del acelerador LHC y el detector CMS y la física que se estudiará. El capítulo 3 da un resumen sobre la reconstrucción de vértices y los métodos utilizados para realizar el ajuste de los vértices primarios. El capítulo 4 describe cómo se hizo la implementación de los algoritmos estudiados en este trabajo. El capítulo 5 muestra los resultados obtenidos en la validación y el capítulo 6 las conclusiones.

# CAPÍTULO 2

## LHC Y CMS

Para poder encontrar el Bosón de Higgs y explicar algunos aspectos del Modelo Estándar aún no comprendidos, como el origen de la rotura espontánea de simetría en el sector electrodébil, es necesario colisionar partículas a muy altas energías; con esta finalidad se construye en el CERN (*“Counseil Europeen pour la Recherche Nucleaire”*) un acelerador de partículas en un túnel circular de 27 km de longitud, 3.8 m de diámetro, y una profundidad media de unos 100 m, diseñado para acelerar y colisionar protones a energías del orden de los  $TeV^1$ ; denominado Gran Colisionador de Hadrones “LHC” (por su siglas en inglés *“Large Hadron Collider”*). En este capítulo se dará introducción breve al LHC y el Detector CMS.

### 2.1 Modelo Estándar

El **Modelo Estándar** (habitualmente abreviado como SM, del inglés *Standard Model*) es una descripción consistente de la interacción entre partículas elementales exceptuando la gravedad. Este modelo explica en forma satisfactoria los resultados obtenidos en un gran número de experimentos de Física de Altas Energías. Uno de

---

<sup>1</sup>  $TeV$  es una unidad de energía 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.  $1eV = 1.602176462 \times 10^{-19} J$

los pilares del modelo es la identificación de cantidades conservadas en las interacciones entre las partículas elementales y la relación entre estas cantidades.

Según el Modelo Estándar toda la materia conocida está constituida de partículas de espín semientero (fermiones) clasificadas en dos grupos dependiendo de las interacciones que pueden experimentar. El grupo de los leptones lo forman aquellos fermiones que no sufren la interacción fuerte y sólo interaccionan mediante interacciones débiles y electromagnéticas. Este grupo lo constituyen el *electrón*, el *muón*, el *leptón tau* y sus *neutrinos*. Solo el electrón es estable en la materia ordinaria. Los correspondientes neutrinos son eléctricamente neutros e interaccionan solo débilmente.[1] [2] [6] [5]

El resto de los fermiones fundamentales forman el segundo grupo: los quarks. Estos llevan carga de color y son sensibles a las interacciones débiles y electromagnética. Se han descubierto seis sabores (tipos) de quarks. Estos son (*u*) “*up*”, (*d*) “*down*”, (*s*) “*strange*”, (*c*) “*charm*”, (*b*) “*bottom*” y (*t*) “*top*”. La materia ordinaria está formada por quarks tipo *u* y *d*. La combinación de dos *quarks u* y un *quark d* constituye el protón, mientras que el neutrón consiste de dos *quarks d* y un *quark u*. Los quarks no se pueden observar como partículas libres, pero su existencia se deduce de un gran número de datos experimentales. Tanto los leptones como los quarks se agrupan en tres familias (también llamadas generaciones) como se muestra en la tabla 2-1.[1] [2] [6] [5]

El Modelo Estándar considera la existencia de tres interacciones fundamentales entre los fermiones:



Tabla 2-1: Partículas fundamentales del Modelo Estándar

	Leptones				Quarks			
Familias	Nombres	Sigla	Masa ( $GeV/c^2$ )	Carga $Q$	Nombres	Sigla	Masa ( $GeV/c^2$ )	Carga $Q$
1 <sup>a</sup>	electron	$e$	$5.11 \times 10^{-4}$	-1	up	$u$	$(1.5-3) \times 10^{-3}$	-1/3
	neurino $e$	$\nu_e$	$< 1 \times 10^{-8}$	0	down	$d$	$(3-7) \times 10^{-3}$	+2/3
2 <sup>a</sup>	muón	$\mu$	0.106	-1	charm	$c$	1.3	-1/3
	neutrino $\mu$	$\nu_\mu$	$2 \times 10^{-4}$	0	strange	$s$	0.1	+2/3
3 <sup>a</sup>	tau	$\tau$	1.7771	-1	top	$t$	175	-1/3
	neutrino $\tau$	$\nu_\tau$	$< 0.02$	0	bottom	$b$	4.3	+2/3

- **La fuerza electromagnética:** Transmitida por *fotones*; presente en todas las partículas con *carga eléctrica*; regula las interacciones atómicas y moleculares.
- **La fuerza nuclear débil:** Responsable de la desintegración radioactiva.
- **La fuerza de color:** Actúa entre quarks y es la responsable de que estos permanezcan unidos formando *nucleones*, así como de que los nucleones no se dispersen en los núcleos atómicos.

Las interacciones se describen en el Modelo Estándar por medio de teorías “*gauge*” (de calibración) y a través del intercambio de partículas de espín entero (*bosones*). Las dos primeras interacciones (*débil y electromagnética*) están unificadas según el modelo electrodébil. No obstante la unificación de las tres fuerzas no se realiza dentro del Modelo Estándar, sino que se introducen tres *constantes de acoplamiento* (una por cada interacción). El marco matemático en el que se desarrolla el Modelo Estándar es la unión de tres grupos de simetría:  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ <sup>2</sup>. La gravedad no es considerada en el Modelo Estándar, sin embargo se piensa que existe una partícula intermediaria llamada gravitón predicha por la teoría de gravedad cuántica. El bosón de Higgs no está asociado a ninguna

---

<sup>2</sup> Los subíndices de los grupos de simetría representan:  $C$  la carga de color,  $L$  la helicidad izquierda y  $Y$  la hipercarga.

interacción fundamental según el Modelo Estándar. El llamado mecanismo de Higgs es la teoría encargada de proveer de masas a los fermiones y bosones de gauge [7]. En la tabla 2-2 se muestran los bosones mensajeros o intermediarios junto con las interacciones a las que están asociados y la intensidad relativa de cada una de éstas.

Tabla 2-2: Interacciones descritas por el Modelo Estándar junto con los grupos gauge y los bosones asociados a cada una de ellas. En la última columna de la derecha se representan las constantes fundamentales que indican la intensidad relativa de cada interacción

Interacción	Grupo gauge	Bosón	Sigla	Espín	Masa ( $GeV/c^2$ )	Carga $Q$	Fuerza relativa
Electromagnética	U(1)	fotón	$\gamma$	1	0	0	$\alpha_{em} = 1/137$
Débil	SU(2)	bosones intermedios	$W^\pm$	1	80.4	$\pm 1$	$\alpha_{weak} = 1.02 \times 10^{-5}$
			$Z^0$	1	91.2	0	
Fuerte	SU(3)	Gluones	$g$	1	0	0	$\alpha_s(M_Z) = 0.121$
Gravitatoria		gravitón	$G$	2	0	0	
		Higgs	$H$	0	$m_H > 114$	0	

## 2.2 El Bosón de Higgs

En el Modelo Estándar, los bosones gauge y los fermiones elementales adquieren masa mediante el mecanismo de Higgs. Una discusión detallada puede encontrarse en las referencias [3],[4] y [7]. Aquí solo se dará un resumen de las ideas básicas sobre el bosón de Higgs y la física de éste.

Cuando un electrón se mueve por un material, ese electrón es atraído por los iones positivos que forman el material. Eso hace que la masa efectiva del electrón aumente hasta incluso 40 veces la masa que tendría un electrón en el vacío. Esa masa se llama “efectiva” porque no es un aumento de masa real, sino que la partícula parece que tiene más masa. Si aplicamos un campo eléctrico, veremos que tiene que aplicarse un campo más grande para mover al electrón que está dentro de una red

que a uno que está en el vacío.

Higgs tomó esta idea para su campo. Se supone que las partículas se mueven por un campo llamado “campo de Higgs”. La interacción de las partículas con ese campo hace que estas tengan resistencia a ser movidas (y por tanto les confiere la masa). Es decir que, según Higgs, la interacción de las partículas con el bosón de Higgs (que es la partícula que transporta el campo de Higgs) es lo que les da masa. Incluso el bosón de Higgs tiene masa debido a las interacciones de esos bosones entre si.

Esto podría ser una idea extravagante si no fuera porque la existencia de ese bosón explicaría la rotura de simetría entre el campo electromagnético y el nuclear débil. Es decir, porque los fotones no tienen masa y los bosones  $W$  y  $Z$  (que son los responsables de transmitir la interacción débil) sí la tienen. Por eso se considera importante el bosón de Higgs.

En el Modelo Estándar, la interacción fuerte viene descrita por la Cromodinámica Cuántica ( $QCD$ ). Las partículas que median esta interacción son ocho gluones vectoriales de masa nula, eléctricamente neutros y portadores de carga de color. El hecho de que los gluones tengan color hace que no solo interactúen con los quarks, sino también entre ellos. Sus interacciones son tales que aumentan con la distancia. Esto hace que la constante de acoplamiento fuerte  $g_s$  (o, de manera equivalente,  $\alpha_s = g_s^2/4\pi$ ) sea pequeña a altos momentos transferidos pero grande para bajos momentos, lo cual lleva al confinamiento de los quarks dentro de hadrones de color neutro, que son las partículas observadas. Esta propiedad se conoce como libertad asintótica.

El grupo de simetría  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  describe las interacciones electrodébiles. Las partículas mediadoras de esta interacción son los tres bosones vectoriales,  $W^\pm$  y  $Z$ , y el fotón,  $\gamma$ .

El hecho de que los bosones débiles sean masivos indica que  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  no es una simetría del vacío. Por el contrario, el que el fotón tenga masa nula refleja que  $U(1)_{em}$  si lo es. Así pues, el Modelo Estándar postula que la simetría electrodébil está espontáneamente rota,  $SU(2)_L \times U(1)_Y \longrightarrow U(1)_{em}$ , por la existencia de un doblete de campos escalares complejos (campos de Higgs) con valor esperado del vacío distinto de cero. El así llamado mecanismo de Higgs dota de masa a los bosones  $W^\pm$  y  $Z$ , y a los fermiones. Esto da lugar, como consecuencia, a la predicción de una partícula nueva *el bosón de Higgs*,  $H$ . Este debe ser escalar, eléctricamente neutro y masivo; sin embargo, su masa no está fijada en la teoría y no ha sido observado en los experimentos. No ocurre así con el resto de partículas del Modelo Estándar, cuya existencia está confirmada por los experimentos.

## 2.3 LHC

El acelerador LHC (*“Large Hadron Collider”*) situado en la frontera franco-suiza, en las inmediaciones de Ginebra, colisionará protones a una energía de 14  $TeV$  en el sistema del centro de masa y tendrá una luminosidad<sup>3</sup> de  $10^{34} cm^{-2} s^{-1}$ .

---

<sup>3</sup> 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  $n_1$  y  $n_2$  representan las partículas de los haces,  $f$  es la frecuencia de colisión de los haces 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  $pb^{-1}$

Para conseguir los  $14 \text{ TeV}$  de energía del centro de masas del LHC son necesarios otros aceleradores ya existentes en el CERN. Como se muestra en la figura 2-1<sup>4</sup>, el LINAC (“Acelerador Lineal de Protones”) acelerará los protones hasta  $50 \text{ MeV}$ , después el PSB (“Proton Synchrotron Booster”) hasta alrededor de  $1.4 \text{ GeV}$ , el PS (Proton Sincrotón) hasta  $26 \text{ GeV}$  y finalmente el SPS (“Super Proton Synchrotron”) hasta  $450 \text{ GeV}$ , Después los haces se inyectan en el LHC, donde alcanzarán la energía de  $7 \text{ TeV}$ .

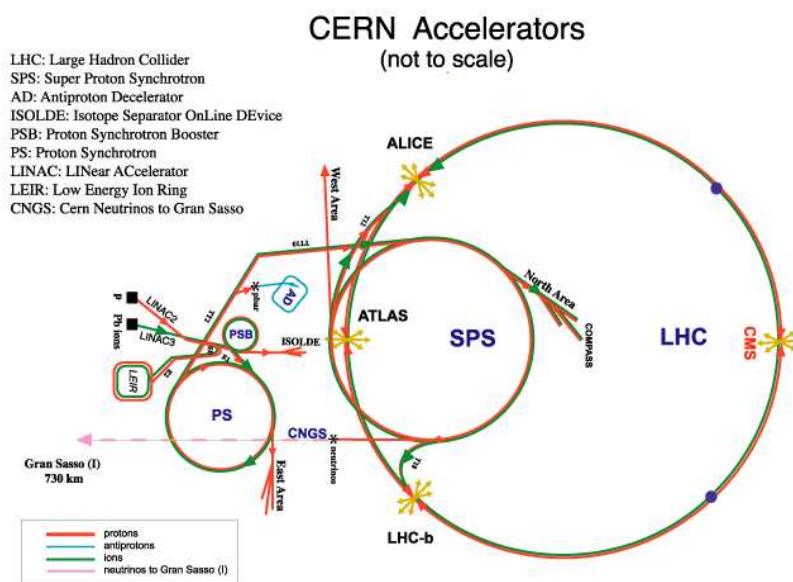


Figura 2-1: Sistema de aceleradores de CERN.

Para mantener los haces de protones con una energía de  $7 \text{ TeV}$  a lo largo de la circunferencia de  $27 \text{ Km}$  del LHC, se necesitan campos magnéticos muy intensos. Con este fin se han diseñado dipolos que proporcionan un campo magnético máximo de  $8.4 \text{ T}$  para cada uno de los haces. La construcción de estos dipolos son uno de

<sup>4</sup> Todas las figuras usadas en este trabajo, fueron extraídas de páginas web y artículos relacionadas con el acelerador LHC y el experimento CMS.

los retos más importantes a los que se enfrenta el proyecto LHC. Ver figura 2-2.

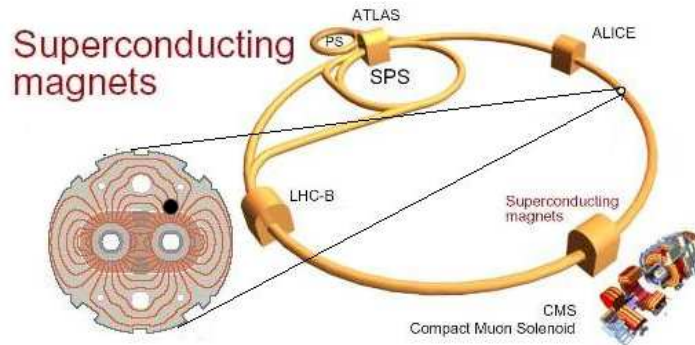


Figura 2-2: Dipolos del LHC.

Para hacer circular los haces de protones dentro del túnel se ha desarrollado un nuevo tipo de imán que contiene dos cavidades, permitiendo el paso de dos haces de manera simultánea y aprovechando el mismo imán para la aceleración de ambos. El imán diseñado cuenta con dos bobinas en un criostato común.

Para que el acelerador sea un instrumento efectivo en el nuevo rango de energía a explorar, es necesario acumular un gran número de eventos. En el LHC la frecuencia de cruce de los haces es de  $40 \text{ MHz}$ . Esto permite estimar que la luminosidad instantánea puede aumentar desde un valor inicial de  $L \approx 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (*baja luminosidad*) hasta un valor final de  $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (*alta luminosidad*).

Para alcanzar esta luminosidad de  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  se generarán colisiones de aproximadamente 2808 paquetes de protones con  $1.15 \times 10^{11}$  protones por paquete, espaciados a intervalos de tiempo de  $25 \text{ ns}$  por el campo magnético de  $8.33 \text{ T}$ ; esperando que se produzcan 19 interacciones por cruce de haces, es decir  $1 \times 10^9$  interacciones por segundo por cada experimento.

Dentro de LHC, situados en los puntos de interacción protón-protón, existen 4 experimentos con propósitos diferentes como se muestra en la figura 2-3. ALICE (“*A Large Ion Collider Experiment*”) se dedicará a los iones pesados. LHC-b (“*LHC-beauty*”) realizará estudios sobre el *quark b*. Mientras que por otra parte, ATLAS (“*A Toroidal LHC Apparatus*”) y CMS (“*Compact Muon Solenoid*”) son detectores de carácter general cuyo propósito es el estudio de la física protón-protón, encontrar evidencias experimentales de la existencia del bosón de Higgs y estudiar la física mas allá del Modelo Estándar.[8][9]

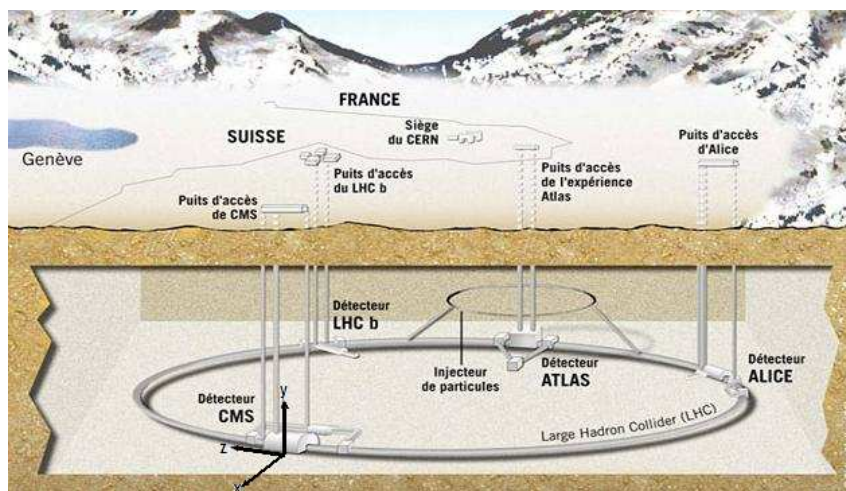


Figura 2-3: Disposición de los experimentos ALICE, LHCb, ATLAS y CMS en el LHC.

## 2.4 CMS

El detector CMS es un dispositivo de 12500 toneladas de peso, cilíndrico de 21.6 m de largo y 15 m de diámetro, cuya finalidad es la detección de muones. Su utilidad en la detección del bosón de Higgs radica por ejemplo, en el hecho de que si éste tiene una masa de unos 150 GeV puede decaer en dos bosones Z, cada uno de los cuales

decaería a su vez en un muón y un anti-muón. La detección de este tipo de eventos puede proporcionar por lo tanto evidencia clara del bosón de Higgs y de su masa.

CMS está compuesto de distintos sistemas de detección, como se muestra en la figura 2-4. En la primera capa del detector, en el interior de éste, se encuentra el detector central de trazas (*“Tracking chamber”*) encargado de medir la trayectoria de las partículas en la región cercana a la colisión. La segunda capa es el calorímetro electromagnético ECAL compuesto de cristales de tungstenato de plomo ( $PbWO_4$ ). Este se utiliza para medir con precisión las energías de electrones y fotones. La tercera capa es el calorímetro hadrónico HCAL, hecho con un material más denso (latón o acero), con fibras de cuarzo o plásticos de centelleo intercalados que permiten determinar la energía de hadrones (protones, neutrones, piones y kaones). La cuarta capa es el imán: un solenoide superconductor de niobio y titanio que crea un campo de unos  $4 T$  para curvar la trayectoria de las partículas cargadas y así poder determinar su momento a partir del radio de curvatura. Por encima de todos estos dispositivos se encuentran las cámaras de muones que registran las trayectorias de los muones. Estas cámaras tienen su propio campo magnético, para calcular los momentos de estas partículas, y están hechas con gruesas planchas de acero. La Figura 2-5 muestra un corte transversal del detector en el cual se muestra las interacciones de diferentes tipos de partículas a través de éste.

El sistema de coordenadas en CMS es un sistema 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. Se utilizan las coordenadas  $(r, \phi)$  en el plano transversal al haz donde  $r$  es la coordenada radial  $\phi$  es el ángulo azimutal en el plano  $xy$   $z$  sigue siendo paralelo al haz y el ángulo polar  $\theta$  se define con respecto a



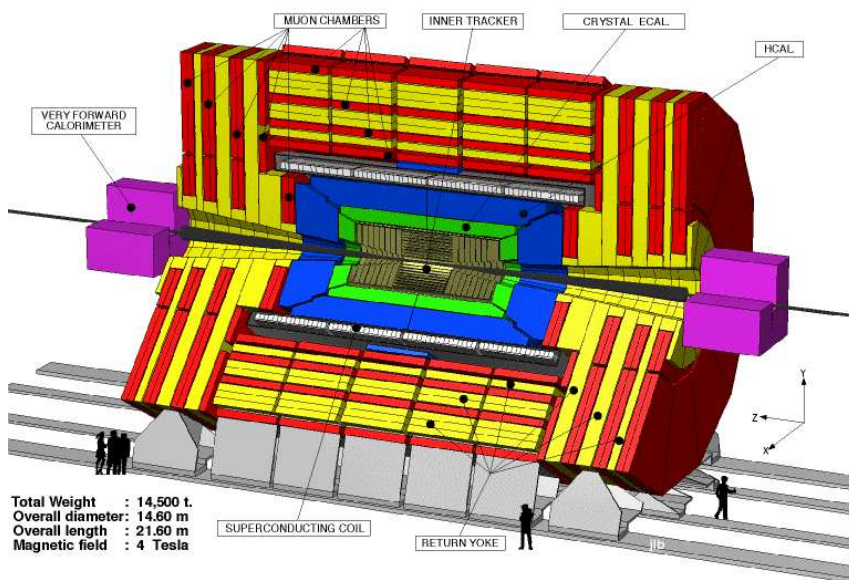


Figura 2-4: Esquema del detector CMS.

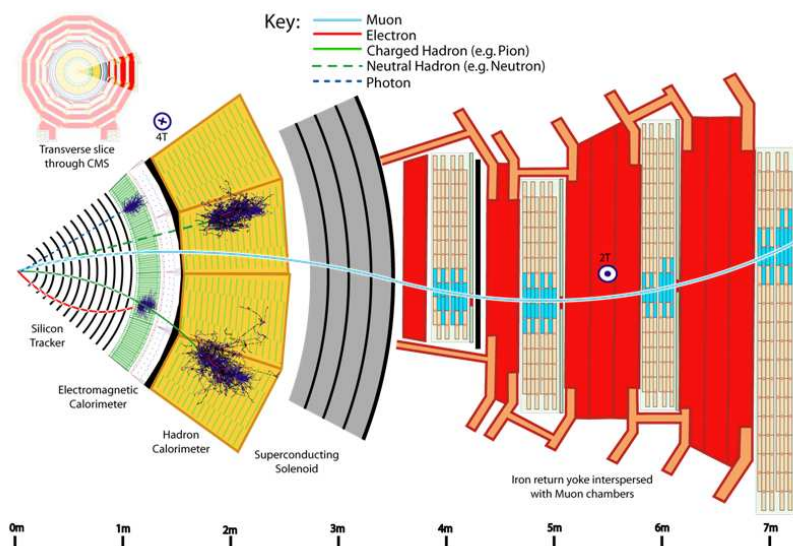


Figura 2-5: Interacciones de las partículas en el detector CMS.

ese eje. En lugar del ángulo  $\theta$ , se utiliza la pseudorapidez<sup>5</sup>,  $|\eta| = -\ln(\tan\frac{\theta}{2})$  [10][12].

## 2.5 Física del Bosón de Higgs en el acelerador LHC

El bosón de Higgs en las colisiones protón-protón se puede producir a través de distintos procesos dependiendo de su masa. Como se puede ver en la figura 2–6[13], la producción está dominada por la fusión gluon-gluon en un amplio rango de masas posibles. Los procesos de producción asociados como  $qq \rightarrow qqHW$ ,  $qq \rightarrow qqHZ$ ,  $qq/gg \rightarrow t\bar{t}H$ ,  $qq/gg \rightarrow b\bar{b}H$  tienen secciones transversales mucho menores. La producción a través  $qq \rightarrow qqH$  (10% de la sección transversal  $gg \rightarrow t\bar{t}H$ ) también es importante [14].

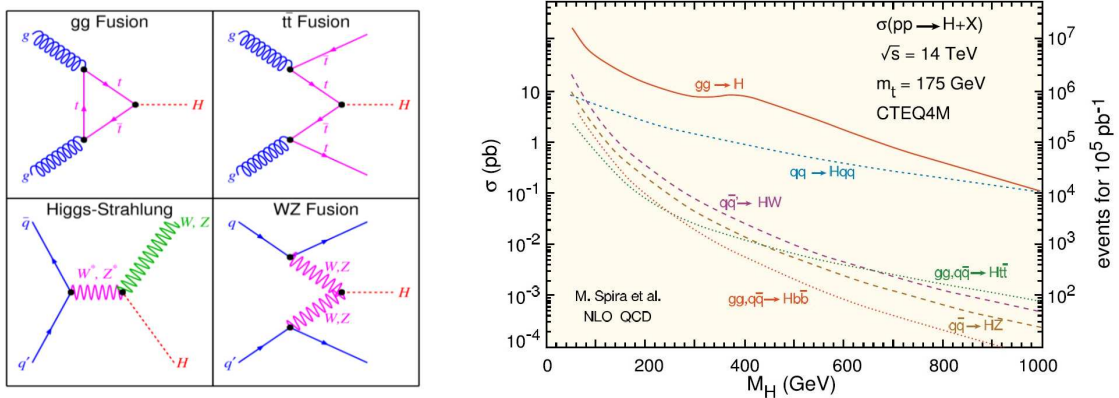


Figura 2–6: A la izquierda se encuentran los diagramas de Feynman de los principales mecanismos de producción del Bosón de Higgs en la colisión protón-protón.  $gg \rightarrow H$ ,  $qq \rightarrow qqH$ ,  $gg \rightarrow t\bar{t}H$ ,  $qq \rightarrow W, ZH$ . A la derecha se muestra la sección eficaz de producción del Bosón de Higgs en función de  $m_H$ .

<sup>5</sup> La Pseudorapidez,  $\eta$ , es una coordenada espacial que describe el ángulo formado por una partícula y el eje del rayo. Mientras que  $\theta$  aumenta la pseudorapidez disminuye.

El bosón de Higgs se observará a partir de los siguientes canales:  $H \rightarrow b\bar{b}$ ,  $H \rightarrow \gamma\gamma$  o  $H \rightarrow 4l$ ,  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ,  $H \rightarrow W^+W^-$  y  $H \rightarrow ZZ \rightarrow ll\nu\nu$  [3][7][12] mostrados en la figura 2-7[13] y descritos a continuación.

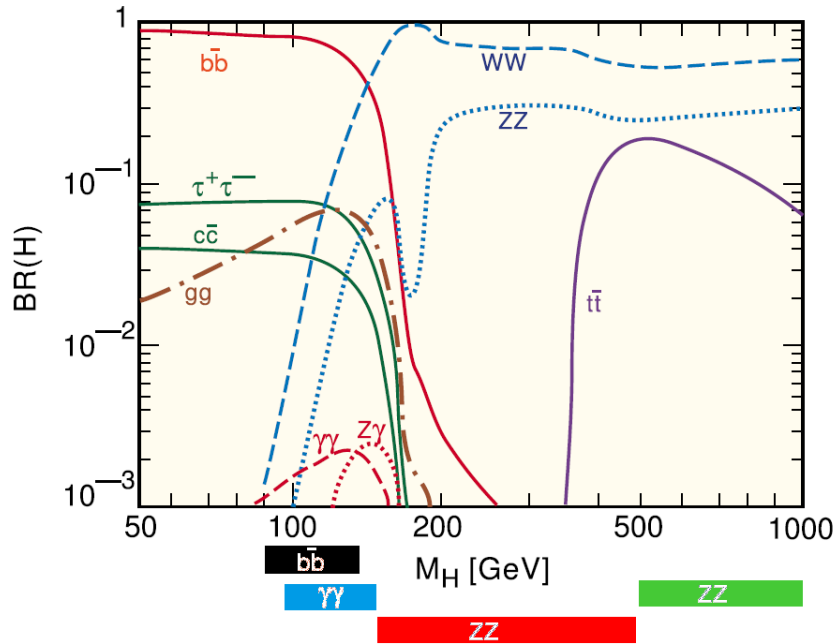


Figura 2-7: Fracción de desintegración del Bosón de Higgs en función de  $m_H$ .

La barra negra de la figura 2-7 muestra que el canal  $H \rightarrow b\bar{b}$  para una masa de Higgs ( $m_H$ ) entre  $80\text{GeV}$  y  $110\text{GeV}$  tiene la mayor fracción de desintegración (“branching ratios”) (BR), pero esta señal es muy difícil de extraer por la elevada contaminación de sucesos hadrónicos de alta multiplicidad.

Señales como  $H \rightarrow \gamma\gamma$  o  $H \rightarrow 4l$  (donde  $\ell = e, \mu, \nu, \tau$ ) con BR mucho menor darán una señal más clara.

La barra azul de la figura 2-7 muestra que el canal  $H \rightarrow \gamma\gamma$  para  $m_H$  entre  $95\text{ GeV}$  y  $130\text{ GeV}$  es más claro pero está sujeto a las condiciones del calorímetro electromagnético (ECAL) en su capacidad para identificar partículas, precisión en

la medida del ángulo y resolución energética.

La barra roja de la figura 2-7 muestra el canal  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$  para  $m_H$  entre  $150 \text{ GeV}$  y  $500 \text{ GeV}$ . Este es el más fácilmente observable y proporciona una señal clara a pesar de su fracción de desintegración baja. Tanto los electrones como los muones finales pueden ser detectados. Este canal requiere una muy buena resolución de energía-momento y una buena capacidad de identificación de electrones y muones. La reconstrucción de los estados finales contendrá 2 ó 4 electrones y estará basada principalmente en la información procedente del ECAL.

En la figura 2-7 para  $m_H \approx 2m_W \approx 160.8 \text{ GeV}/c^2$  en el canal  $H \rightarrow W^+W^-$  se puede observar el umbral de producción de  $W^+W^-$ , al igual que la disminuye drásticamente la fracción de desintegración de  $ZZ$ .

Para valores de  $m_H$  mayores a  $500 \text{ GeV}$ , la sección eficaz de la producción de pares  $ZZ$  y  $W^+W^-$  disminuye significativamente de manera que es necesario recurrir a estados finales semi-hadronicos como  $H \rightarrow ZZ \rightarrow ll\nu\nu$ .

La barra verde de la figura 2-7 muestra que el canal  $H \rightarrow ZZ \rightarrow ll\nu\nu$  puede ser observado en la región de masas de  $600 \text{ GeV} < m_H < 1000 \text{ GeV}$ . La señal debería ser observada como un exceso de desintegraciones  $ZZ \rightarrow ll$  con una gran energía transversal perdida  $E_T^{miss}$ . Sin embargo, tiene el inconveniente de que en todos los estados finales que contienen leptones hay al menos un neutrino que escapa a la detección.

# CAPÍTULO 3

## RECONSTRUCCIÓN DE VÉRTICES PRIMARIOS EN CMS

En el detector CMS los puntos de interacción de la colisión protón- protón se reconstruyen a través de la reconstrucción de trazas y determinando cuales de estas trazas vienen de la colisión. Este punto de interacción se denomina vértice primario o vértice de producción.

### 3.1 Definiciones Técnicas

- **Parámetro de Impacto:** (o Punto de impacto) es el punto más cercano de la traza al eje del haz.
- **Momento Transversal:** ( $p_T$ ): hace referencia a la suma vectorial de la descomposición del momento en el plano perpendicular al haz, es decir  $P_T = p_x \vec{i} + p_y \vec{j}$ .
- **Significancia:** se define como  $\sigma(x) = \frac{x}{\Delta x}$  donde  $\Delta x$  es la incertidumbre de la variable  $x$ .
- **Jet(chorro):** es un cono estrecho de hadrones y otras partículas producidas por la hadronización de un quark o gluon en una colisión. Debido a que las partículas con carga de color como los quarks, no pueden existir en forma libre, se fragmentan en

hadrones antes de poder ser detectadas directamente, convirtiéndose en jet. Estos jet son medidos en un detector de partículas y se estudian con el fin de determinar las propiedades del quark original.

### 3.2 El sistema Interior de Detección de Trazas (“Inner Tracker”)

La detección de trazas[16][17] constituye la parte central del detector CMS. Se trata de un detector de silicio, que se encuentra próximo al punto de interacción y consiste de un detector 2d “pixel” y un detector de silicio “microstrips” (micro tiras) unidimensional. Al cruzar estos materiales, las partículas cargadas pierden energía, debido principalmente a la ionización. Este efecto de ionización se mide y se transforma en señales eléctricas. Los requisitos que deben cumplir este detector son los siguientes:

- Los detectores deben ser resistentes a la radiación.
- Su respuesta debe ser rápida (colisiones cada 25ns).
- El número de canales por cada elemento sensible tiene que ser lo suficientemente alto.
- La granularidad espacial tiene que ser lo suficientemente fina para tener alta precisión de la medición de los parámetros de las trazas.

Estos requisitos permitirán la detección y la búsqueda eficiente de impactos (“hits”) en las capas del detector y una propagación rápida de las posibles trazas candidatas (“track candidate”) a trayectorias para la reconstrucción de trazas.

### 3.3 Reconstrucción de Trazas

La reconstrucción de trazas es una parte fundamental del análisis de datos en CMS. Partiendo de las mediciones echas de los impactos (“hits”) en las distintas capas del detector situado lo más cerca del punto de colisión, el objetivo es determinar cuántas partículas se han creado, así como sus momentos y direcciones en el punto de interacción. La reconstrucción de trazas está tradicionalmente dividida en dos subtareas: la búsqueda de trazas y el ajuste de trazas.

1. La búsqueda de trazas es una tarea de reconocimiento de patrones, que tiene por objeto dividir las mediciones de posición en varios subconjuntos. Cada uno de estos subconjuntos contiene mediciones que se espera procedan de una única partícula.
2. El ajuste de trazas intenta dar la información de posición en cada una de las trazas. Proporcionada por el buscador de trazas, de tal forma que se optimice la estimación de los parámetros, que describen el estado de la partícula cerca de la colisión protón- protón (vértice). Ese conjunto de parámetros pueden ser, por ejemplo, el momento, dirección y ángulos de posición de las coordenadas en una superficie de referencia.[15].

Los pasos para la reconstrucción de una traza son los siguientes:

- **Semillas:** Partiendo de las trazas candidatas para la reconstrucción, la semilla contendrá los parámetros e incertidumbres iniciales de la trayectoria. Esto se puede obtener de las siguientes formas: una opción es a través de un sistema de seguimiento de detectores externos, pero la precisión de los parámetros en este método no presentan una buena información. Otra forma que presenta mejor información, es la construcción interna de la semilla a partir del conjunto impactos “hits” provenientes de la primera trazas de la partícula cargada. [11],[19],[18].

- **Reconocimiento de parámetros o construcción de la traza:** A partir de las semillas en las distintas capas del detector se comienza a estimar la posible trayectoria de las partículas a partir del método combinatorio del filtro Kalman<sup>1</sup>; el cual realiza un proceso iterativo entre las semillas de cada capa[11],[18].
- **Resolución de la ambigüedad:** Al reconstruir una traza se puede dar el caso que esta provenga de varias semillas, o que las semillas de la traza de lugar a otra traza candidata [11],[18].
- **Ajuste y alisado de la traza:** Como se menciona, el ajuste intenta dar la información de la posición de cada traza a partir de una colección de “hits” y a valores estimados de los parámetros de la traza. La traza se reajusta y se alisa usando una aproximación de los mínimos cuadrados, con una combinación del filtro Kalman, comenzado con los “hits” más cercanos al haz [11],[18].

### 3.4 Parámetros de la Traza

Los parámetros de la traza se definen a partir del parámetro de impacto. Estos parámetros son:  $d_0$ ,  $z_0$ ,  $\varphi$ ,  $\cot\theta$ , y el momento transversal  $p_T$ [11].  $d_0$  y  $z_0$  son las coordenadas 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).  $\varphi$  es el ángulo azimuthal del vector de momento de la traza y se toma en

---

<sup>1</sup> El filtro Kalman, es un método para procesar datos de manera iterativa. Los parámetros se corrigen en cada iteración dependiendo del error de predicción que se haya cometido en la iteración anterior, siendo equivalente a una reducción al mínimo de los mínimos cuadrados. Éste es un estimador lineal y óptimo desde el punto de vista de mínimos cuadrados; todo el ruido aleatorio es Gaussiano y no existen mediciones periféricas.





a la resolución del detector, tienen un tiempo de vida significativo y por lo tanto una distancia de vuelo significativa (*i.e.* podemos resolver la separación entre el vértice primario y el vértice secundario, de acuerdo a un valor preestablecido para la significancia  $\frac{x}{\Delta x}$  de esta separación). Esta distancia puede ser del orden de milímetro. La consecuencia es que la posición del vértice secundario no es igual a la del vértice primario y que el vértice secundario tiene una distancia significativa a la línea del haz. La masa y el tiempo de vida significativo de los decaimientos da como resultado que las trazas de los vértices secundarios no apunten exactamente al vértice primario y tienen un parámetro de impacto de significancia grande[19].

**Vértice tercero:** Las partículas procedentes del vértice secundario, como los hadrones, suelen decaer en otras partículas. Estas partículas pueden crear un vértice adicional en su punto de decaimiento. Este vértice es llamado vértice terciario (TV) y tiene propiedades similares a las del vértice secundario. La posición del vértice terciario no es la misma que la del vértice primario. La distancia a la línea de haz es significativa para el vértice terciario. Además, las trazas del vértice terciario tienen un parámetro de impacto transversal significativo[19].

La figura 3–2 muestra los 3 tipos de vértices posibles de encontrar en una cadena de decaimiento  $b - c$ [19].

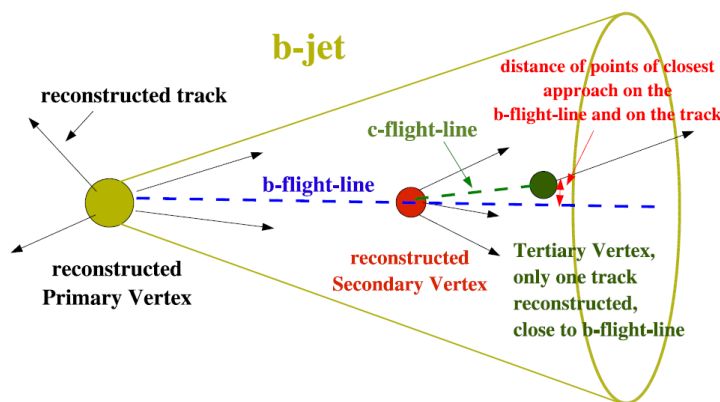


Figura 3–2: Esquema de los distintos vértices en una cadena de decaimiento  $b - c$ .

La reconstrucción de vértices se puede descomponer en un problema de reconocimiento de patrones (búsqueda de vértice) y un problema de estadística (ajuste de vértice). Los algoritmos de reconstrucción de vértices son necesarios para reconstruir el punto principal de interacción, así como para la detección y la reconstrucción de los vértices secundarios (por ejemplo, b-jet). La búsqueda de vértices tiene que ser capaz de encontrar las trazas de vértices en topologías difíciles, tales como la presencia de decaimiento de vértices muy cercanos del vértice primario o cadenas de decaimiento con una separación muy pequeña entre los vértices.

Los algoritmos de búsqueda de los vértices primarios comienza con la definición de las trazas candidatos. Los vértices primarios hechos de por lo menos tres trazas que cruzan en el punto más cercano al eje  $z$  se utilizan para construir una lista de vértices candidatos. Las trazas incompatibles con cualquiera de los vértices candidatos son excluidas (secundarios). En el segundo paso sólo los vértices primarios candidatos, con por lo menos tres trazas válidas con un momento transversal  $p_T > 1\text{GeV}/c$  se mantienen. La posición  $z$  de cada vértice está dada por el valor medio de los parámetros de impacto  $z$  relacionados a las trazas [20].

Los ajustes de vértices deberán tener una buena estimación de los parámetros del vértice (posición, matriz de covariancia) para un sistema de trazas dado así como indicadores de la calidad ( $\chi^2$  total, número de grados de libertad, o pesos de la traza).

### 3.6 Ajustes para la Reconstrucción de Vértices

Los algoritmos de ajuste de vértice pueden ser divididos en los algoritmos de mínimos cuadrados y algoritmos robustos.

En los algoritmos de mínimos cuadrados se utilizan todas las trazas, con un peso de 1. En el software de CMS el “*KalmanVertexFitter*” es uno de estos ajustes.

Los ajustes robustos son habilitados para pesos bajos de las trazas, y son por lo tanto menos sensibles a los valores atípicos (“*outliers*”) trazas mal medidas (“*mis-measured*”) (atípicos de Tipo-1) o trazas de otro vértice (atípicos de Tipo-2 ). Una medida común de la robustez es la fracción de los valores atípicos por debajo de la cual el ajuste del vértice no se ve afectada. En el software de CMS el “*AdaptiveVertexFitter*” y “*TrimmedVertexFitter*” son ajustes robustos.

En esta sección daremos una descripción breve de los distintos algoritmos utilizados en la reconstrucción de vértices en el software de CMS.

Para realizar la reconstrucción de vértices se ha elegido la parametrización perigee [21] que se usa para describir la trayectoria de una partícula cargada en un campo magnético, donde la trayectoria de la partícula está modelada por una hélice, que se define con respecto a un punto de referencia ( punto de linealización<sup>2</sup> , en este caso), y define la traza en su punto más cercano (al plano transversal) al punto de referencia, ver figura3-3 [22].

Para una partícula cargada los 5 parámetros son:

---

<sup>2</sup> Si no es provista una posición inicial, se calcula una rápida aproximación de la posición del vértice, esta posición es llamada punto de la linealización, este punto es el punto de una expansión lineal de la ecuación que describe la dependencia de los parámetros medidos de la traza.

- $\varepsilon_\rho$ : Distancia transversal más cercana al punto de referencia (*con signo*). Por convenio, el signo es positivo si el punto de referencia es a la izquierda del punto más cercano.
- $Z_\rho$ : Distancia longitudinal del punto de máxima aproximación.
- $\theta$ : Ángulo polar del vector de momento.
- $\varphi_\rho$ : Ángulo azimuthal del vector momento en el punto de máxima aproximación.
- $\rho$ : Curvatura transversal (*con signo*), donde el signo es el negativo de la carga.

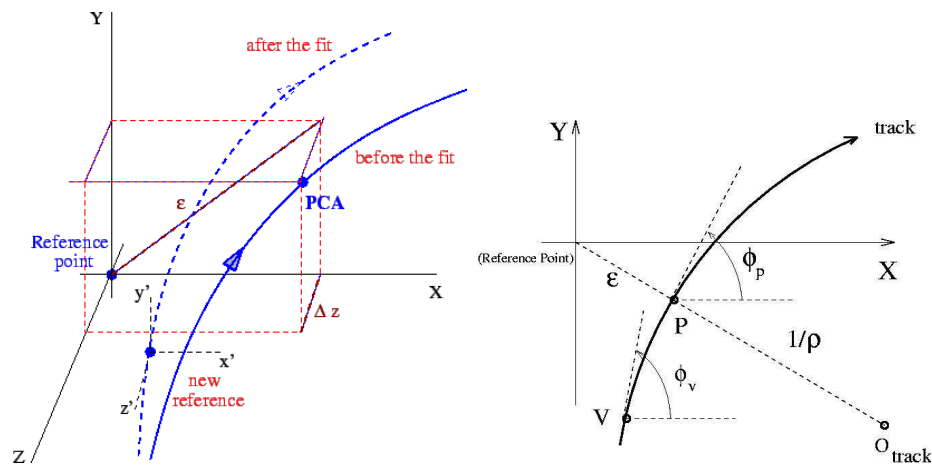


Figura 3-3: Parámetros de perigee.

### 3.6.1 Ajuste Kalman

El *Kalman Vertex Fitter* (KVF) es un ajuste basado en el filtro Kalman, en el caso de la reconstrucción de vértices este filtro reduce al mínimo las distancias de todas las trazas con respecto a la posición del vértice. En este caso, el estimador es imparcial y tiene una varianza mínima. La estimación de la distribución residual “Res” y la distribución residual estandarizada “Pull” tienen distribuciones Gaussianas y el valor de la función objetiva (función minimizada) para el mínimo, obedece a la distribución de  $\chi^2$ . Para modelos no lineales o ruidos no -Gaussianos esta estimación lineal sigue siendo óptima. Sin embargo, es muy sensitiva a los datos

atípicos (outlier), y el sesgo al ajuste de los parámetros es proporcional a las medidas periféricas [21], [24].

Por lo general, la distancia de las trazas a la posición del vértice es aproximada por una función afín al vértice utilizando la serie de Taylor a primer orden; convirtiéndose en una ecuación lineal de  $\hat{v}$  y se puede resolver explícitamente o iterativamente con el filtro de Kalman.

### 3.6.2 Ajuste Adaptable “*Adaptive*”

El *Adaptive VertexFillter* (AVF) es un ajuste de tipo robusto el cual usa un proceso iterativo re-ponderado del filtro Kalman donde los pesos actuales dependerán de la compatibilidad de las trazas a la posición del vértice previamente estimada. Este algoritmo tiene la ventaja que los pesos puede ser fraccionarios (asignación suave) y que varían de una iteración a la siguiente, hasta que el ajuste converge. Ningún cálculo estimado del peso de las trazas o de la fracción de los outliers es necesario.

En este método en lugar de reducir al mínimo la suma de residuos, se minimiza la suma de residuos al cuadrado por medio de una función de peso  $w_i$ ; así los datos outliers no son descartados sino son re-ponderados según  $w_i$  [23]:

$$w_i(r_i^2) = \frac{1}{1 + e^{\frac{r_i^2 - r_{cutoff}^2}{2T}}} \quad (3.1)$$

El peso  $w_i$  puede interpretarse como la probabilidad de que la traza  $i$  pertenece al vértice  $v$ . La constante  $r_{cutoff}$  define el parámetro de corte o limitación y  $T$  es un parámetro que controla la forma de la dependencia funcional en la ecuación 3.1 (llamado temperatura). Un  $T$  igual a cero es equivalente a un cambio brusco en  $r_{cutoff}$ . La figura 3-4 muestra el peso como una función del  $r$ , con un corte en  $r_{cutoff} = 3$ ,

para tres temperaturas diferentes.

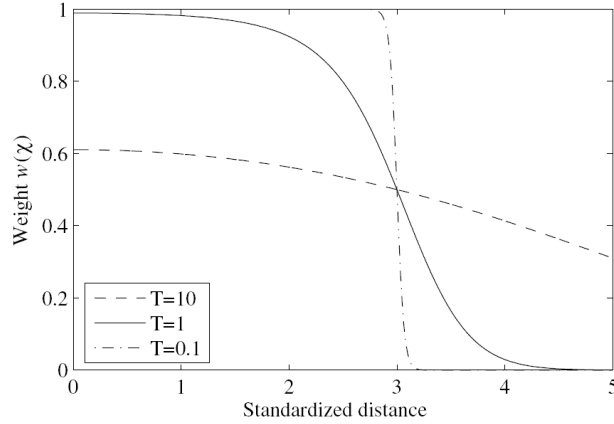


Figura 3–4: Función de peso  $w_i$  para tres valores distintos de  $T$ .

La definición de los pesos  $w_i$  en la ecuación 3.1 introduce la noción de la *temperatura* ( $T$ ) como un medio para evitar caer en los mínimos locales. La iteración comienza definiendo una temperatura inicial  $T_{ini} > 1$ . La temperatura se reduce en cada paso en una secuencia bien definida que converge a 1. La iteración se detiene tan pronto como la temperatura es igual a uno y la posición del vértice candidato no ha cambiado por más de un micrón. La aplicación del método “*AdaptiveVertexFilter*” es sencilla, dada la implementación del filtro Kalman.

### 3.6.3 Ajuste de Recorte (“*Trimmed*”)

El *TrimmedVertexFitter* (TVF), es un ajuste de tipo robusto que consta en una robustificación convencional del filtro Kalman donde las trazas incompatibles con el vértice son eliminadas una por una del vértice. Es una tarea tediosa de ajuste iterativo.

En primer lugar, todas las trazas son ajustadas a un vértice. Las trazas menos compatibles con el vértice se eliminan, y el vértice es reajustado. Este procedimiento

se repite, hasta que la compatibilidad de todas las trazas está por debajo de un valor umbral dado. Una vez que una traza es rechazada, no será incluida nuevamente en el vértice.

La compatibilidad de cada traza al vértice es calculada a partir de la distancia estandarizada al vértice. Para las trazas correctamente asignadas (*siempre que los errores de sus parámetros sean correctamente estimados en momento de ajustar la traza*) esta distancia es distribuida de acuerdo con una distribución  $\chi^2$  con 2 grados de libertad (1 grado de libertad para un vértice con 2-trazas). Si el antes mencionado valor umbral es escogido como el  $(1 - \alpha)$  cuantile (quantile)<sup>3</sup> de la distribución  $\chi^2$  y si al vértice no se le han asignado incorrectamente trazas, entonces la probabilidad de rechazar una buena traza es igual a  $\alpha$ . Sin embargo, si se asignó trazas incorrectamente, la probabilidad de rechazar una buena traza puede ser muy por encima de  $\alpha$ [21], [24].

### 3.6.4 Ajuste de Suma de Gaussianas “*GaussianSum*”

El *GaussianSumFitter* (GSF), es un ajuste basado en la suma de Gaussianas. Esto hace que éste funcione cuando las observaciones de los errores siguen una distribución no-Gaussiana a diferencia de la estimación lineal KVF que está optimizada cuando los errores tienen distribución Gaussiana. En este método, las distribuciones de los errores, las mediciones (parámetros de la pista en el caso de la reconstrucción de vértices) y las cantidades estimadas por el modelo son mezclas de funciones Gaussianas. Este ajuste es utilizado por lo general para la reconstrucción de electrones,

---

<sup>3</sup> Quantile son valores de la distribución que la dividen en partes iguales, es decir, en intervalos, que comprenden el mismo número de valores.



en donde la pérdida de energía no es del todo Gausiana y puede ser modelada usando una mezcla de ajustes Gaussianos[24].

### 3.6.5 Ajuste de Suma de Gaussianas Adaptable “*AdaptiveGaussianSum*”

El *AdaptiveGaussianSumFitter* (A-GSF), es la combinación del *AdaptiveVertexFitter* (AVF) y *GaussianSumFitter* (GSF). En efecto, como en el AVF el cálculo de la posición de vértice es independiente del cálculo del peso de la traza, el filtro de Kalman utilizado en esta implementación por defecto puede ser sustituido por un GSF[24].

# CAPÍTULO 4

## DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO REALIZADO PARA LA RECONSTRUCCIÓN DE VÉRTICES PRIMARIOS EN CMS

En este capítulo se describe la implementación del algoritmo *TrimmedVertexFitter* (TVF) en CMSSW<sup>1</sup> para la reconstrucción de vértices, así como la implementación de un filtro para seleccionar trazas confiables (*“Track Quality”* (TQ)) en la reconstrucción de vértices primarios de CMSSW.

### 4.1 Implementación del Ajuste *“Trimmed”* para Vértices Primarios (TVF)

Al colisionar haces de partículas aparecen de nuevas partículas. La forma de estudiar esto es a través de la estimación del punto de interacción de las partículas, conocido como ajuste o reconstrucción de vértices. Para esto se usa la reconstrucción de trazas de las partículas que originaron el vértice. La reconstrucción de vértices por lo general se hace usando los mínimos cuadrados que es muy eficiente ya que utiliza los parámetros de las trazas reconstruidas, los cuales poseen un error gaussiano conocido. Sin embargo en experimentos como CMS la existencia de mucho material en el detector origina que los parámetros de las trazas y sus errores presenten imperfecciones en sus estimaciones, alejándose de una simple distribución

---

<sup>1</sup> CMSSW (*CMS Software*) es la infraestructura del software oficial de CMS, la cual se usa para generar, simular, digitalizar y analizar datos, así como para hacer la reconstrucción y el análisis tanto de datos simulados como de datos reales.

Gaussiana debido a los múltiples “*scatering*” y la resolución del detector. Esto hace difícil la determinación del vértice. Estas imperfecciones se conocen como datos atípicos (“*outliers*”) que puede originar una mala estimación en las trazas y sus parámetros lo que causa una degradación en la resolución del vértice (Tipo-1) o que las trazas procedentes de otro vértice introduzcan un sesgo en los parámetros del vértice (Tipo-2). Entonces para la reconstrucción de vértices considerando datos atípicos se utilizan métodos robustos como el “*Adaptive*” y el “*Trimmed*”, mencionados en el capítulo anterior.

De estos dos ajustes el *AdaptiveVertexFitter* (AVF) se implementó en CMSSW como el ajuste por defecto para la reconstrucción de vértice. El ajuste *TrimmedVertexFitter* (TVF) no se encontraba listo para su implementación. Sin embargo, este ajuste se había implementado en ORCA<sup>2</sup> y probado su eficiencia. Lo que faltaba era trasladar el código de ORCA a CMSSW. A partir de esta se procedió a buscar el módulo correspondiente a TVF en ORCA y transferir este a CMSSW con el nombre de *TrimmedVertexFitter*; una vez implementado el traslado de TVF se hizo la validación respectiva del código. Los resultados de esta validación se muestran en el capítulo de resultados de esta tesis.

## 4.2 Optimización del Filtro de Selección de Trazas Confiables (“Track Quality”) para Vértices Primarios

Para la producción de vértices primarios se realiza búsqueda de vértices a partir de una reconstrucción global del vértice primario, comenzando con todas las trazas

---

<sup>2</sup> ORCA (*Object Oriented Reconstruction for CMS Analysis*) es la infraestructura de software de CMS anterior a CMSSW

reconstruidas disponibles en el evento. Este proceso sigue los siguientes pasos:

- Una selección inicial de trazas se realiza para rechazar las trazas secundarias, y reducir el tiempo de cálculo. Los criterios de selección son [25]:
  - La significancia del parámetro de impacto transversal  $d_0/\sigma(d_0)$ <sup>3</sup> requerido debe ser menor que un valor configurable, el valor usado por defecto es 3;
  - El  $p_t$  requerido de las trazas debe ser mayor que un valor configurable, el valor usado por defecto es  $1.GeV/c$ .

Finalmente, los vértices primarios reconstruidos son ordenados y devueltos en orden decreciente según su  $p_t$  .

Para tener una mejor selección de trazas para la producción de vértices primarios se aplicó un filtro para selección de trazas confiable llamado “*Track Quality*”(TQ); el cual busca reducir al tiempo de cálculo en al reconstrucción de vértices primarios, al reducir el número de trazas a usar; para esto se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- La significancia del parámetro de impacto transversal  $d_0/\sigma(d_0)$  requerido debe ser menor que 5 (valor configurable).
- El mínimo  $p_t$  requerido de las trazas debe ser mayor que un valor configurable que se varió de 0, 1 y  $4GeV$ .
- El número total de “*hits*” en la capas del detector de silicio debe ser mayor o igual a 8 (valor configurable).

---

<sup>3</sup>  $d_0$  representa la distancia entre el vértice primario y las trazas y  $\sigma(d_0)$  representa el error de  $d_0$

- El número mínimo de “hits” en el detector de pixeles debe ser mayor o igual a 2 (valor configurable).
- El máximo  $\chi^2$  normalizado debe ser menor que 5 (valor configurable).

Al poner los valores de estos parámetros configurables nos da la opción de poder cambiarlos para poder determinar cuál sería el mejor valor para la selección de trazas. La significancia del parámetro de impacto transversal nos indica que la separación entre el haz y las trazas de ser menor que 5 unidades de resolución de parámetro de impacto. El número de “hits” del detector de silicio y el de pixeles nos indica cuántos impactos son necesarios para que las trazas sean consideradas parte del vértice primario; el  $\chi^2$  normalizado nos dice cuán bueno es el ajuste de las trazas. El momento trasverso nos da las trazas que cruzan el vértice.

Esta implementación se realizó en el módulo encargado de buscar vértices primarios, compatibles con la línea del haz, *PrimaryVertexProducer* de CMSSW. En las clases *TrackFilterForPVFinding.cc* y *TrackFilterForPVFinding.h* que se encuentran en el directorio *src* e *interface* respectivamente. La configuración de los valores del TQ se realizó, en el archivo *OfflinePrimaryVerticesFromCTFTracks.cfi* localizada en el directorio *data*.

Bajo estos nuevos criterios implementados, se mejora la selección de trazas para determinar el vértice primario, con los distintos ajustes. Estos resultados se muestran en el proximo capítulo.

# CAPÍTULO 5

## RESULTADOS

En forma general la tarea que realiza el ajuste de vértice toma en cuenta un conjunto de trazas y procede a calcular la mejor estimación de los parámetros del vértice (posición, matriz de covarianzas, restricciones de los parámetros de las trazas y sus covarianzas), así como los indicadores de éxito del ajuste ( $\chi^2$  total, número de grados de libertad, pesos de las trazas). Estos algoritmos de ajuste de vértice pueden ser divididos en los algoritmos de mínimos cuadrados y algoritmos robustos como ya se vió en el capítulo 4. Uno de estos ajustes robustos es el TVF que fue implementado en CMSSW a partir del código existente en ORCA. Para comprobar su funcionamiento se procedió a validar y comparar con los algoritmos existentes KVF AVF. Para realizar la tarea de ajuste es necesario encontrar los vértices primarios candidatos. Para esto se utilizan algoritmos de búsqueda de vértices primarios que se realizan bajo ciertos criterios como son:

- Las trazas reconstruidas son agrupadas en varios vértices candidatos de acuerdo con la coordenada  $z$  del punto de máxima aproximación de las trazas al eje  $z$ .
- Cada vértice primario candidato es ajustado y las trazas incompatibles con el vértice son descartadas.
- Los vértices primarios candidatos compatibles con la línea del haz se conservan.

El módulo *PrimaryVertexProducer* de CMSSW que tiene como objetivo la búsqueda y producción vértices primarios con los distintos ajustes. Una de las

partes importantes en la búsqueda de vértices primarios es la selección de trazas bajo ciertos criterios como se vió en el capítulo 4. Para probar este criterio de selección de trazas se realizó una validación con los distintos ajustes.

Para analizar la eficiencia de los algoritmos de reconstrucción de vértices se toma en cuenta 2 cantidades:

La calidad de estimación del vértice reconstruido se refleja en la resolución o medida de la incertidumbre de la posición transversal  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y longitudinal  $\sigma_z$ . Estas incertidumbres son dadas en  $\mu m$ , y definidas como la desviación estándar del ajuste Gaussiano de los residuos con respecto a la posición simulada en el vértice x, y, z; (i.e parámetro residual) Res:

$$Res = Rec - Sim \quad (5.1)$$

$Rec$  representa la posición del vértice reconstruido y  $Sim$  la posición del vértice simulado y se espera de esta diferencia sea lo más próxima a cero. El promedio de esta diferencia ( $Rec - Sim$ ) puede ser una indicación del alineamiento del detector. Y la resolución  $\sigma$  nos indica la resolución esperada del detector de trazas. La figura 5-1 muestra un ejemplo de la distribución residual.

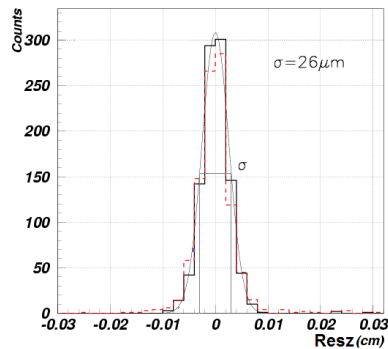


Figura 5-1: Distribución residual.

La otra cantidad es el parámetro residual normalizado  $Pull$  que nos verifica la calidad de la reconstrucción del vértice. Esta se muestra a través de la distribución  $pull$  o distribución residual estandarizada:

$$Pull = \frac{Res}{\sigma_{Rec}} = \frac{Rec - Sim}{\sigma_{Rec}} \quad (5.2)$$

Donde  $Res$  es el parámetro residual y  $\sigma_{Rec}$  es la incertidumbre del vértice reconstruido. Si la estimación de  $\sigma_{Rec}$  es correcta el  $Pull$  debe seguir una distribución Gaussiana Normalizada, es decir con media cero y desviación estándar en la parte central de la distribución de 1. La figura 5–2 muestra un ejemplo de la distribución  $Pull$ .

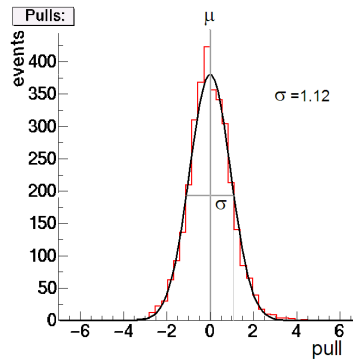


Figura 5–2: Distribución  $Pull$ .

Para efectos del análisis solo es necesario observar el comportamiento de uno de los resultados de la posición transversal sea  $x$  o  $y$ , ya que cualquiera de ellos nos indica el comportamiento en esta posición; mientras que  $z$  representa el comportamiento en la parte longitudinal del vértice.

A partir de estas cantidades y consideraciones se realizó la validación del TVF y el estudio de la optimización del TQ. Las siguientes tablas muestran los resultados obtenidos para el  $Resx$ ,  $Pullx$ ,  $Resz$  y  $Pulz$  de los distintos algoritmos validados.



Los datos utilizados para la validación se encuentran en el buscador DBS (“*Database Bookkeeping System*”) [27]. Éste permite explorar conjuntos de datos que han sido habilitados y encontrar la lista de datos que se necesitan para una muestra en particular. Dando como resultado un enlace que muestra la dirección de los datos en un sitio independiente del nombre del archivo conocido como LFN (“*Logical File Name*”). El resultado mostrado en LFN generalmente empieza por */store* y es análogo a un archivo de configuración.

El trabajo de validación se realizó en distintas versiones de CMSSW. La que se presenta en esta tesis es la versión *CMSSW160*<sup>1</sup>. Para esto se escogieron las muestras disponibles de  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ,  $BJet50 - 120GeV$  y  $CJet50 - 120GeV$ . La primera fue escogida por ser una de las muestras fácil de observar y clara, además de presentar solo vértices primarios. Las dos siguientes se eligieron por tener una alta tasa de producción además de presentar vértices primarios y secundarios.

En la tabla 5-1 se encuentran los resultados obtenidos para la validación del TVF para  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ,  $BJet50 - 120GeV$ , y  $CJet50 - 120GeV$ ; donde se puede observar que los valores del  $Resx$ ,  $Pullx$ ,  $Resz$  y  $Pulsz$  obtenidos para el TVF muestran mejores resultados que los del ajuste no robusto de mínimos cuadrados KVF. También se puede notar que los resultados del TVF son muy próximos a los de la AVF lo cual muestra que este ajuste se puede utilizar en caso que el ajuste por

---

<sup>1</sup> El código de producción desarrollado en CMSSW, está indicado en una serie de números como 160. 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.

defecto AVF no funcione como se espera en la reconstrucción.

Tabla 5–1: Validación de los algoritmos KVF, AVF y TVF con los decaimientos  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ,  $BJet50 - 120GeV$  y  $CJet50 - 120GeV$  para la versión CMSSW 1.6.0

RelVal160	Fitter	ResX( $\mu m$ )	ResZ( $\mu m$ )	PullX	PullZ
$4l$ event (4650)	KVF	$23.02 \pm 0.48$	$31.77 \pm 0.58$	$2.210 \pm 0.037$	$1.662 \pm 0.026$
	AVF	$21.78 \pm 0.60$	$31.25 \pm 0.63$	$1.814 \pm 0.034$	$1.460 \pm 0.023$
	TVF	$22.52 \pm 0.63$	$31.65 \pm 0.64$	$1.883 \pm 0.036$	$1.566 \pm 0.025$
$BJet$ event (1050)	KVF	$26.18 \pm 0.93$	$39.99 \pm 1.89$	$2.079 \pm 0.066$	$2.511 \pm 0.101$
	AVF	$17.76 \pm 0.54$	$21.18 \pm 0.74$	$1.127 \pm 0.029$	$1.105 \pm 0.029$
	TVF	$18.11 \pm 0.62$	$21.55 \pm 0.73$	$1.154 \pm 0.030$	$1.113 \pm 0.031$
$CJet$ event (1050)	KVF	$18.13 \pm 0.64$	$21.85 \pm 0.74$	$1.555 \pm 0.047$	$1.499 \pm 0.045$
	AVF	$14.78 \pm 0.44$	$18.33 \pm 0.57$	$1.163 \pm 0.030$	$1.136 \pm 0.029$
	TVF	$15.17 \pm 0.49$	$18.47 \pm 0.57$	$1.204 \pm 0.031$	$1.152 \pm 0.031$

El canal  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ , es una de las señales más claras de observar en la colisión hadrónica para detectar Higgs, pero los resultados obtenidos en la validación con los distintos ajustes, como se observa en la tabla 5–1, no presentan muchas mejoras con respecto al ajuste de mínimos cuadrados KVF debido a que los resultados mostrados son el promedio de los posibles decaimientos que representa los  $4l$ , es decir,  $4\mu$ ,  $4e$ , ó  $2e2\mu$ . A esto se suma la pérdida de energía del electrón. La forma de mejorar esto es separando los decaimientos posibles de los  $4l$ .

Sin embargo  $BJet50 - 120GeV$  y  $CJet50 - 120GeV$ , muestran una mejora en la validación con respecto al ajuste KVF como se puede observar en la tabla 5–1. Esto se debe a que los hadrones  $b$  y  $c$  producidos en el vértice primario tienen un tiempo de vida considerable y por tanto una distancia recorrida de orden de  $mm$ , lo que hace que las trazas dejadas por estas partículas tengan una alta resolución. La determinación del vértice primario en los  $jets$  se realiza para determinar qué trazas corresponden a los  $jets$  provenientes del vértice primario y así diferenciar las trazas que forman parte del vértice secundario.

Las figuras 5–9, 5–10 muestran la comparación de los histogramas obtenidos para el  $Resx$ ,  $Pullx$ ,  $Resz$  y  $Pulsz$  para los distintos ajustes KVF, AVF y TVF con  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ,  $BJet50 - 120GeV$  y  $CJet50 - 120GeV$ .

En las tablas 5–2,5–3 y 5–4 se muestra los resultados de la reconstrucción de vértices primarios usando el selector de trazas, donde se realizaron distintas pruebas variando el valor del  $minpt$ . Esto se hizo para poder determinar cuál sería el mejor valor de este parámetro. Si comparamos los resultados obtenidos en la tabla 5–2 para un  $minpt > 0$  con los del las tablas 5–3, y 5–4 para un  $minpt > 1$  y un  $minpt > 4$  respectivamente, observamos que los mejores resultados se obtienen con el  $minpt > 0$ . Si comparamos estos resultados con los obtenidos en la tabla 5–1 para la validación de los algoritmos de ajuste sin aplicar un TQ; observamos que los resultados obtenidos con un TQ con un  $minpt > 0$  presentan mejores resultados de todas las validaciones echas. Esto muestra que al aplicar un TQ se produce una mejoría en la reconstrucción de vértices primarios.

Tabla 5–2: Validación de los algoritmos KVF, AVF y TVF con los decaimientos  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ,  $BJet50 - 120GeV$  y  $CJet50 - 120GeV$  aplicando el TQ con  $minpt > 0$  para la versión CMSSW 1.6.0

RelVal160	Fitter	$ResX(\mu m)$	$ResZ(\mu m)$	$PullX$	$PullZ$
$4l$ <i>event</i> (4650) $minpt > 0$	KVF	$20.70 \pm 0.44$	$31.51 \pm 0.60$	$1.953 \pm 0.034$	$1.593 \pm 0.026$
	AVF	$19.79 \pm 0.52$	$31.05 \pm 0.64$	$1.610 \pm 0.031$	$1.420 \pm 0.024$
	TVF	$19.56 \pm 0.53$	$30.70 \pm 0.63$	$1.698 \pm 0.036$	$1.488 \pm 0.024$
$BJet$ <i>event</i> (1050) $minpt > 0$	KVF	$25.98 \pm 0.89$	$42.70 \pm 1.72$	$2.027 \pm 0.062$	$2.495 \pm 0.089$
	AVF	$18.64 \pm 0.60$	$22.86 \pm 0.83$	$1.150 \pm 0.033$	$1.094 \pm 0.028$
	TVF	$19.27 \pm 0.63$	$23.63 \pm 0.80$	$1.170 \pm 0.035$	$1.136 \pm 0.030$
$CJet$ <i>event</i> (1050) $minpt > 0$	KVF	$19.23 \pm 0.71$	$23.82 \pm 0.90$	$1.505 \pm 0.041$	$1.521 \pm 0.046$
	AVF	$15.30 \pm 0.50$	$19.37 \pm 0.61$	$1.147 \pm 0.028$	$1.132 \pm 0.029$
	TVF	$15.92 \pm 0.54$	$19.86 \pm 0.62$	$1.183 \pm 0.028$	$1.145 \pm 0.031$

Las figuras 5–9, 5–10 muestran la comparación de los histogramas obtenidos al aplicar un TQ con distintos  $minpt$  para los distintos ajustes KVF, AVF y TVF con

Tabla 5–3: Validación de los algoritmos KVF, AVF y TVF con los decaimientos  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ,  $BJet50 - 120GeV$  y  $CJet50 - 120GeV$  aplicando el TQ con  $minpt > 1$  para la versión CMSSW 1.6.0

RelVal160	Fitter	$ResX(\mu m)$	$ResZ(\mu m)$	$PullX$	$PullZ$
$4l$ <i>event(4650)</i> $minpt > 1$	KVF	$20.79 \pm 0.45$	$31.49 \pm 0.60$	$1.957 \pm 0.034$	$1.597 \pm 0.026$
	AVF	$19.79 \pm 0.53$	$31.00 \pm 0.64$	$1.610 \pm 0.032$	$1.421 \pm 0.024$
	TVF	$19.55 \pm 0.54$	$30.67 \pm 0.63$	$1.699 \pm 0.036$	$1.488 \pm 0.024$
$BJet$ <i>event(1050)</i> $minpt > 1$	KVF	$27.13 \pm 0.88$	$45.05 \pm 1.73$	$1.963 \pm 0.057$	$2.397 \pm 0.091$
	AVF	$19.60 \pm 0.67$	$24.13 \pm 0.76$	$1.178 \pm 0.033$	$1.144 \pm 0.031$
	TVF	$19.35 \pm 0.64$	$24.26 \pm 0.81$	$1.163 \pm 0.034$	$1.152 \pm 0.031$
$CJet$ <i>event(1050)</i> $minpt > 1$	KVF	$19.03 \pm 0.66$	$25.86 \pm 1.05$	$1.542 \pm 0.044$	$1.527 \pm 0.048$
	AVF	$16.32 \pm 0.53$	$19.81 \pm 0.62$	$1.150 \pm 0.028$	$1.141 \pm 0.029$
	TVF	$16.50 \pm 0.56$	$20.92 \pm 0.63$	$1.184 \pm 0.027$	$1.188 \pm 0.033$

Tabla 5–4: Validación de los algoritmos KVF, AVF y TVF con los decaimientos  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ,  $BJet50 - 120GeV$  y  $CJet50 - 120GeV$  aplicando el TQ con  $minpt > 4$  para la versión CMSSW 1.6.0

RelVal160	Fitter	$ResX(\mu m)$	$ResZ(\mu m)$	$PullX$	$PullZ$
$4l$ <i>event(4650)</i> $minpt > 4$	KVF	$20.17 \pm 0.44$	$31.08 \pm 0.58$	$1.967 \pm 0.035$	$1.581 \pm 0.026$
	AVF	$18.94 \pm 0.52$	$30.63 \pm 0.63$	$1.602 \pm 0.032$	$1.407 \pm 0.024$
	TVF	$18.90 \pm 0.52$	$30.28 \pm 0.65$	$1.695 \pm 0.036$	$1.482 \pm 0.025$
$BJet$ <i>event(1050)</i> $minpt > 4$	KVF	$45.80 \pm 1.87$	$76.49 \pm 4.28$	$2.022 \pm 0.085$	$2.37 \pm 0.14$
	AVF	$40.67 \pm 1.94$	$47.71 \pm 2.68$	$1.515 \pm 0.059$	$1.398 \pm 0.062$
	TVF	$37.16 \pm 2.24$	$48.04 \pm 3.15$	$1.393 \pm 0.054$	$1.322 \pm 0.062$
$CJet$ <i>event(1050)</i> $minpt > 4$	KVF	$31.57 \pm 1.57$	$43.80 \pm 1.77$	$1.614 \pm 0.061$	$1.646 \pm 0.056$
	AVF	$27.11 \pm 1.18$	$39.41 \pm 1.79$	$1.338 \pm 0.044$	$1.311 \pm 0.038$
	TVF	$28.26 \pm 1.27$	$37.30 \pm 1.62$	$1.349 \pm 0.045$	$1.230 \pm 0.035$

$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ,  $BJet50 - 120GeV$  y  $CJet50 - 120GeV$ .

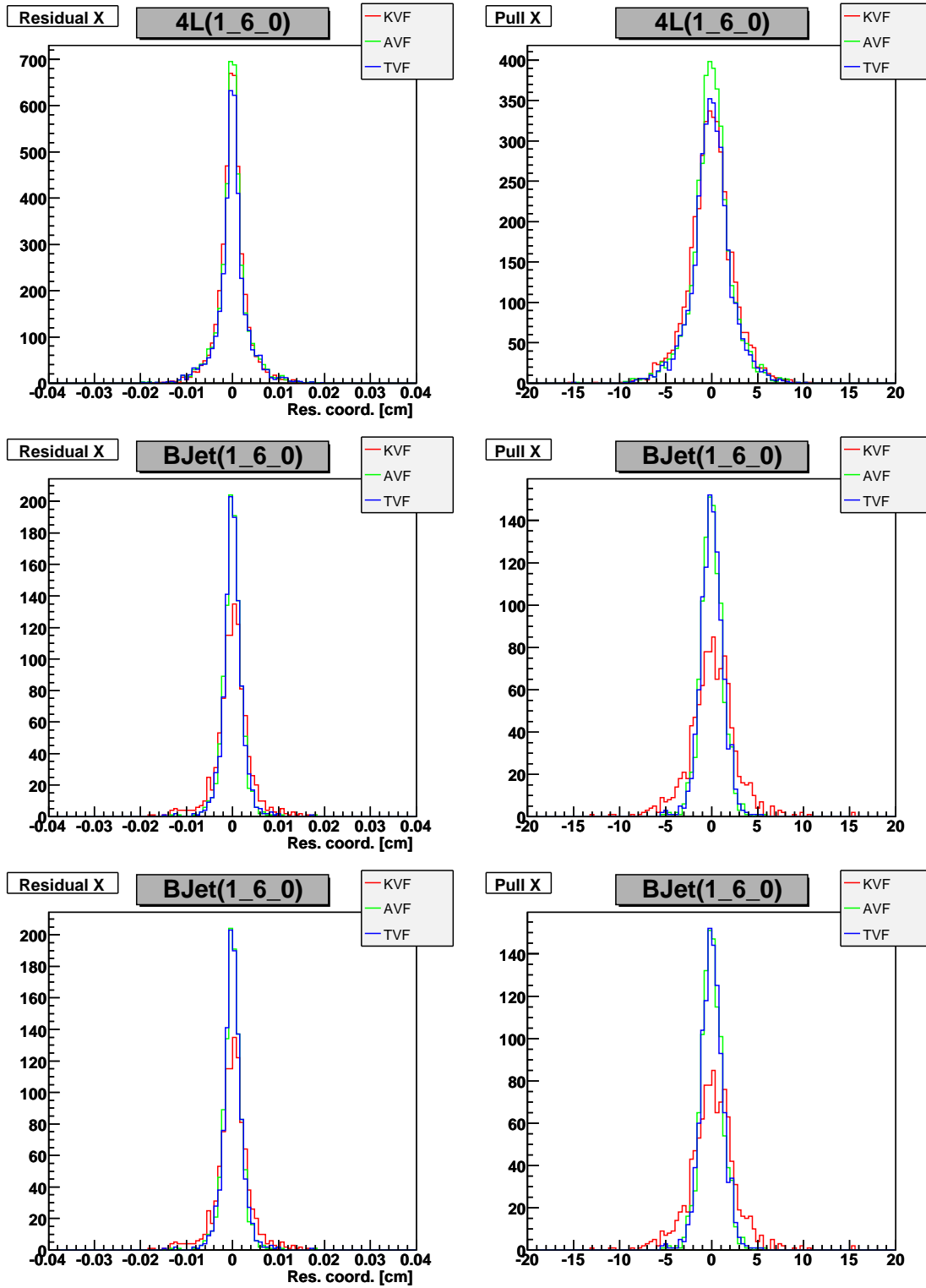


Figura 5-3: Histogramas del Resx y Pullx para  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l, BJet50 - 120GeV$  y  $CJet50 - 120GeV$  con los distintos ajustes KVF, AVF y TVF.

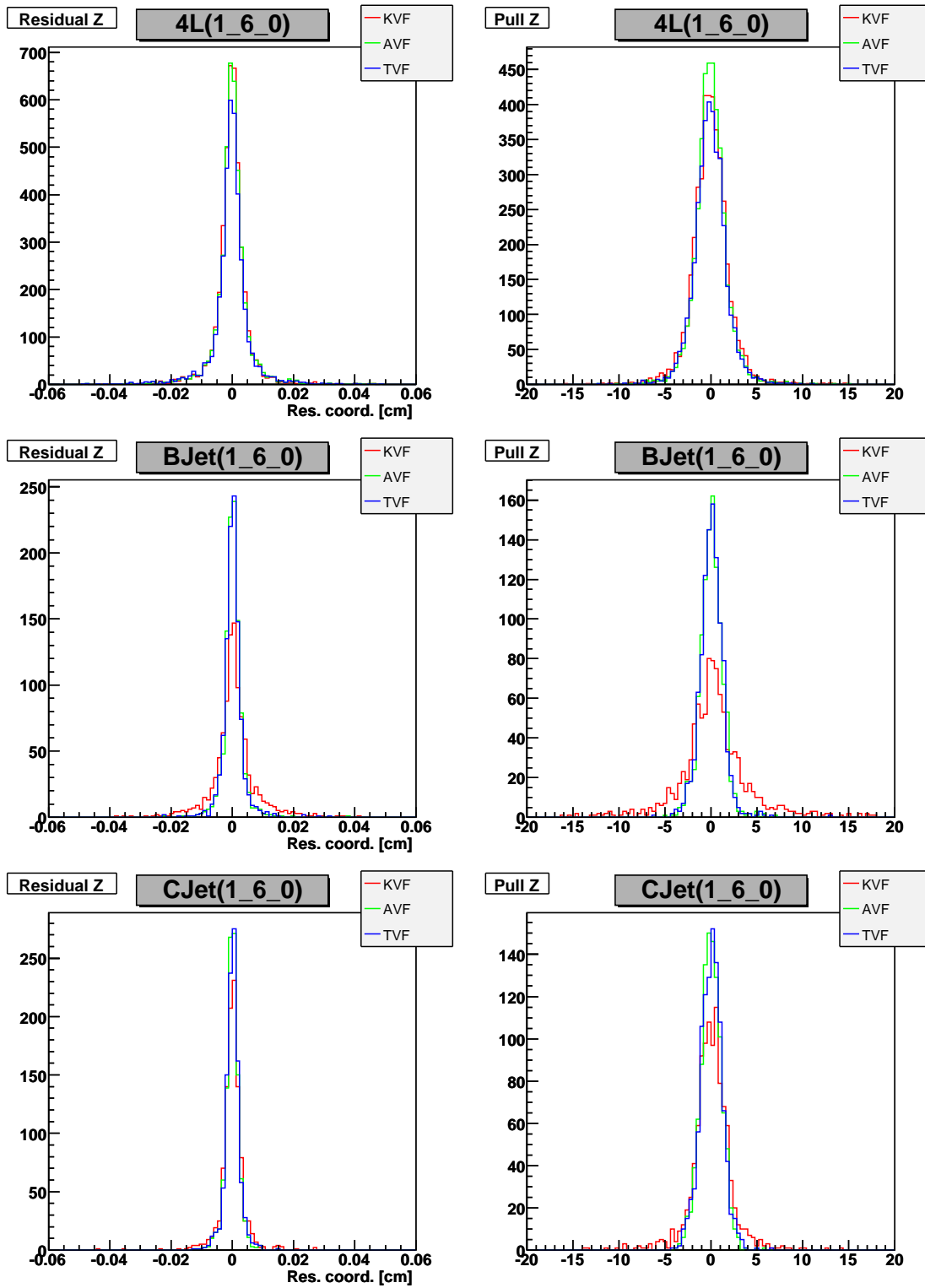


Figura 5-4: Histogramas del Resz y Pullz para  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l, BJet50 - 120GeV$  y  $CJet50 - 120GeV$  con los distintos ajustes KVF, AVF y TVF.

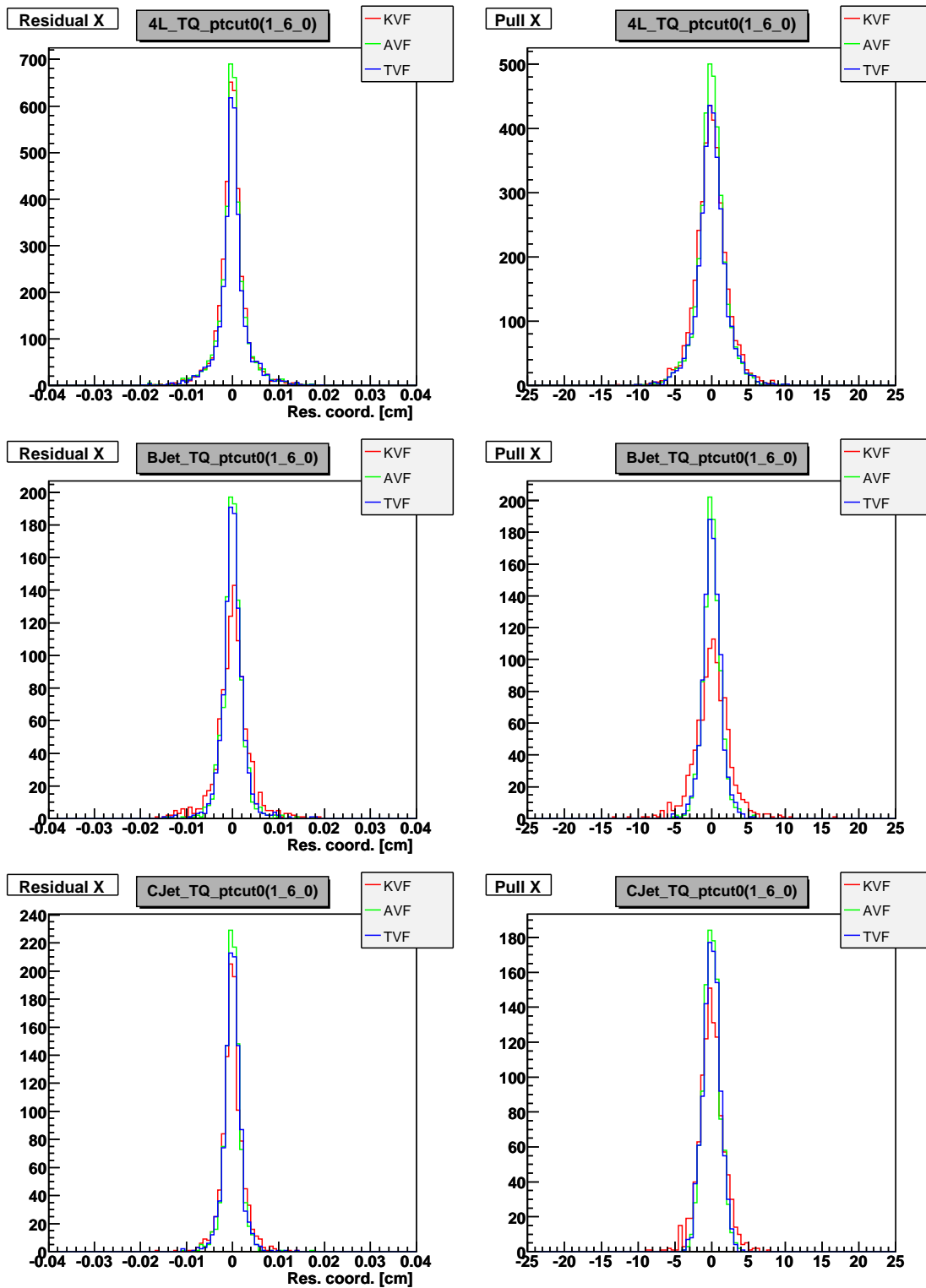


Figura 5–5: Histogramas del Resx y Pullx para  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l, BJet50 - 120GeV$  y  $CJet50 - 120GeV$  con los distintos ajustes KVF, AVF y TVF aplicando un TQ con  $minpt > 0$  para la versión CMSSW 1.6.0.

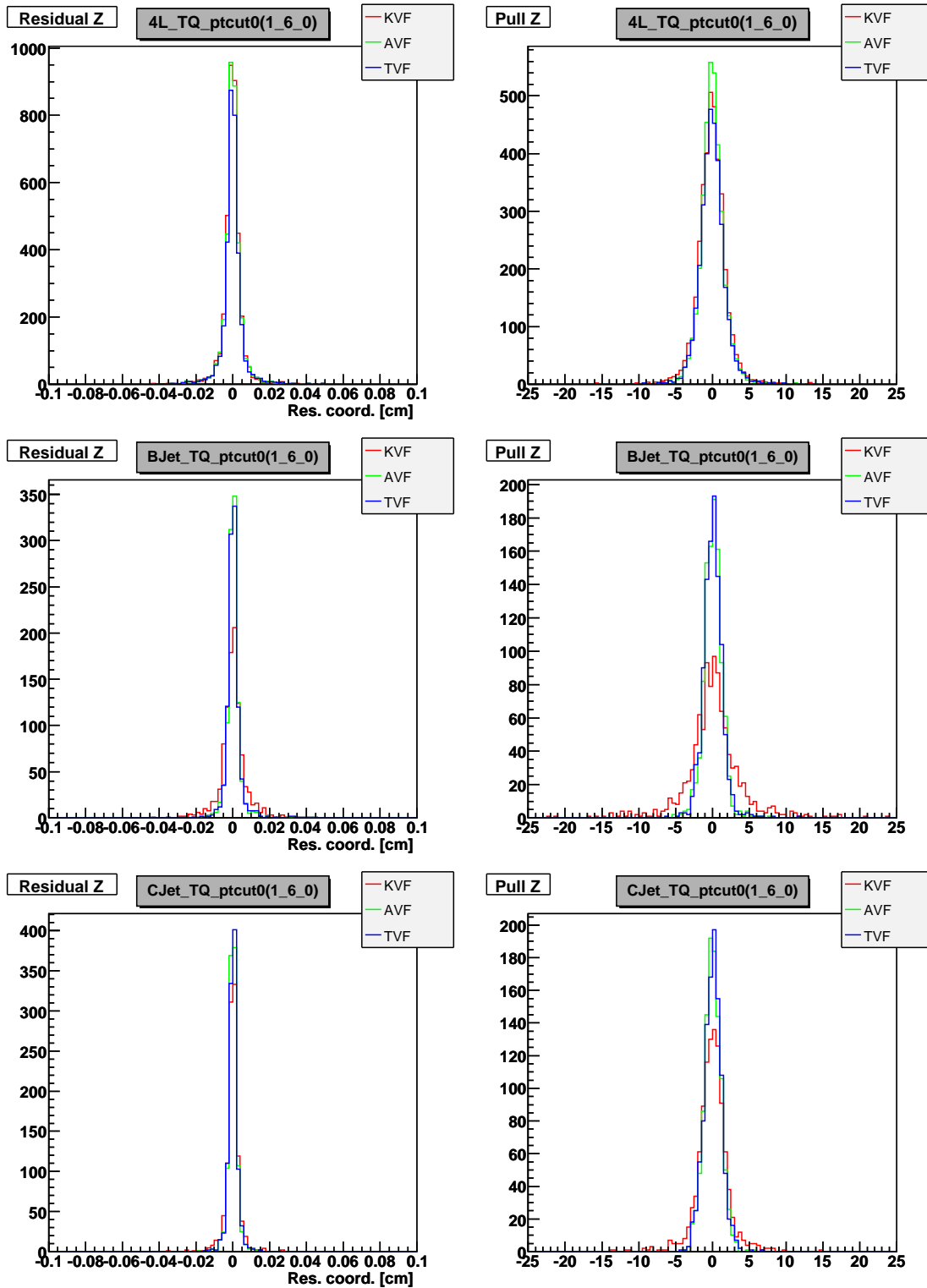


Figura 5–6: Histogramas del Resz y Pullz para  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l, BJet50 - 120GeV$  y  $CJet50 - 120GeV$  con los distintos ajustes KVF, AVF y TVF aplicando un TQ con  $minpt > 0$  para la versión CMSSW 1.6.0.



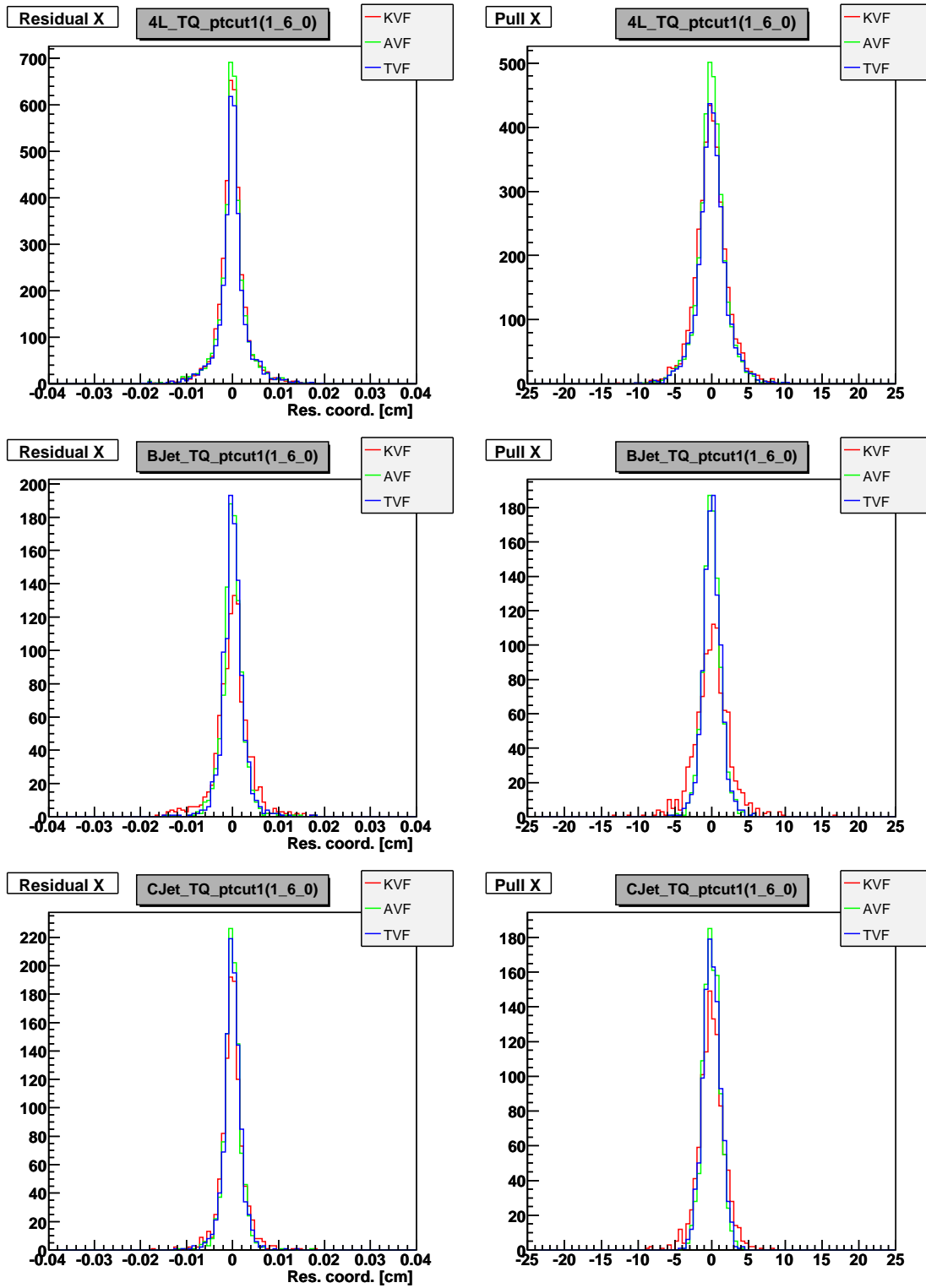


Figura 5–7: Histogramas del Resx y Pullx para  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l, BJet50 - 120GeV$  y  $CJet50 - 120GeV$  con los distintos ajustes KVF, AVF y TVF aplicando un TQ con  $minpt > 1$  para la versión CMSSW 1.6.0.

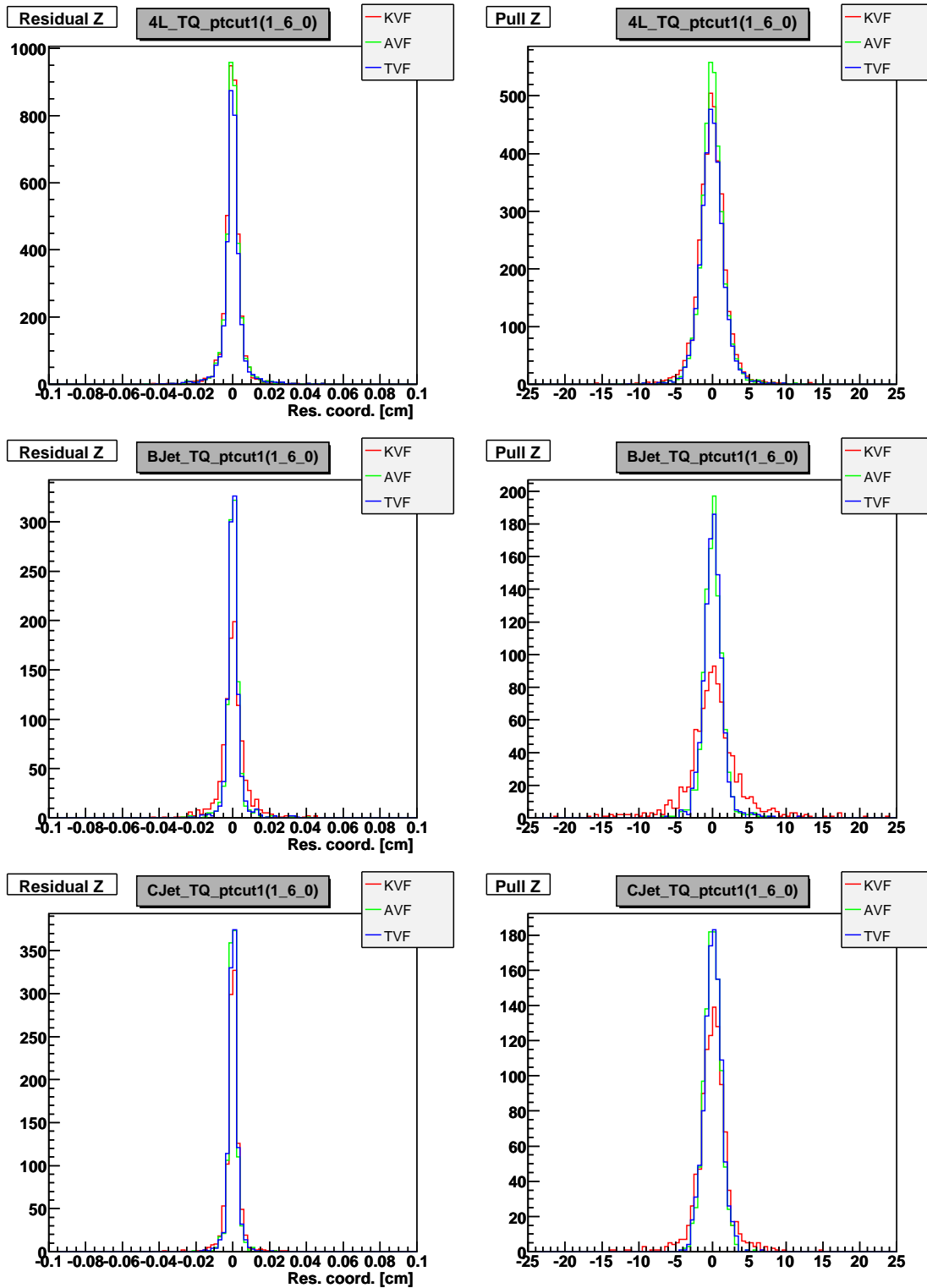


Figura 5–8: Histogramas del Resz y Pullz para  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l, BJet50 - 120GeV$  y  $CJet50 - 120GeV$  con los distintos ajustes KVF, AVF y TVF aplicando un TQ con  $minpt > 1$  para la versión CMSSW 1.6.0.

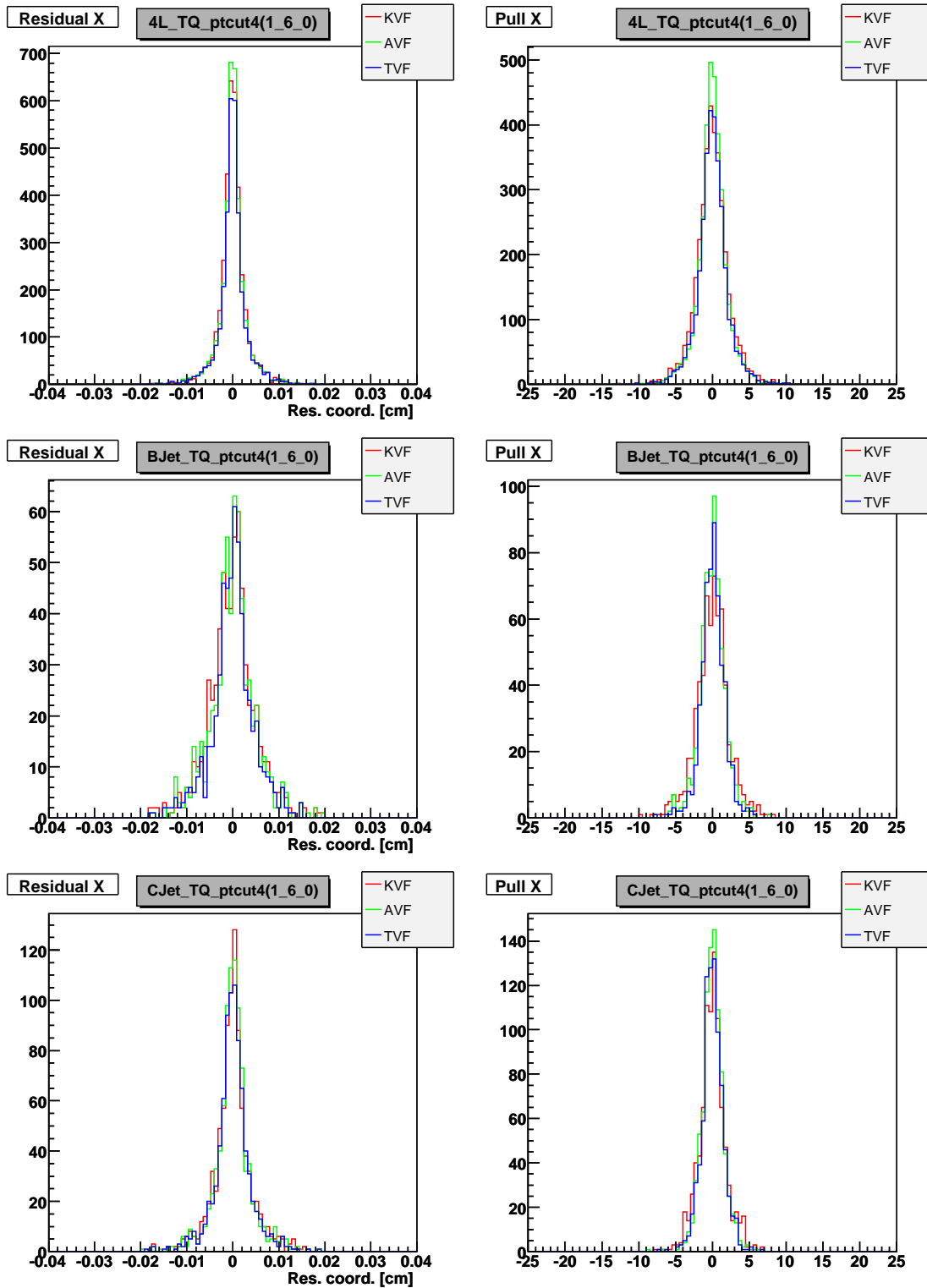


Figura 5–9: Histogramas del Resx y Pullx para  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l, BJet50 - 120GeV$  y  $CJet50 - 120GeV$  con los distintos ajustes KVF, AVF y TVF aplicando un TQ con  $min_{pt} > 4$  para la versión CMSSW 1.6.0.

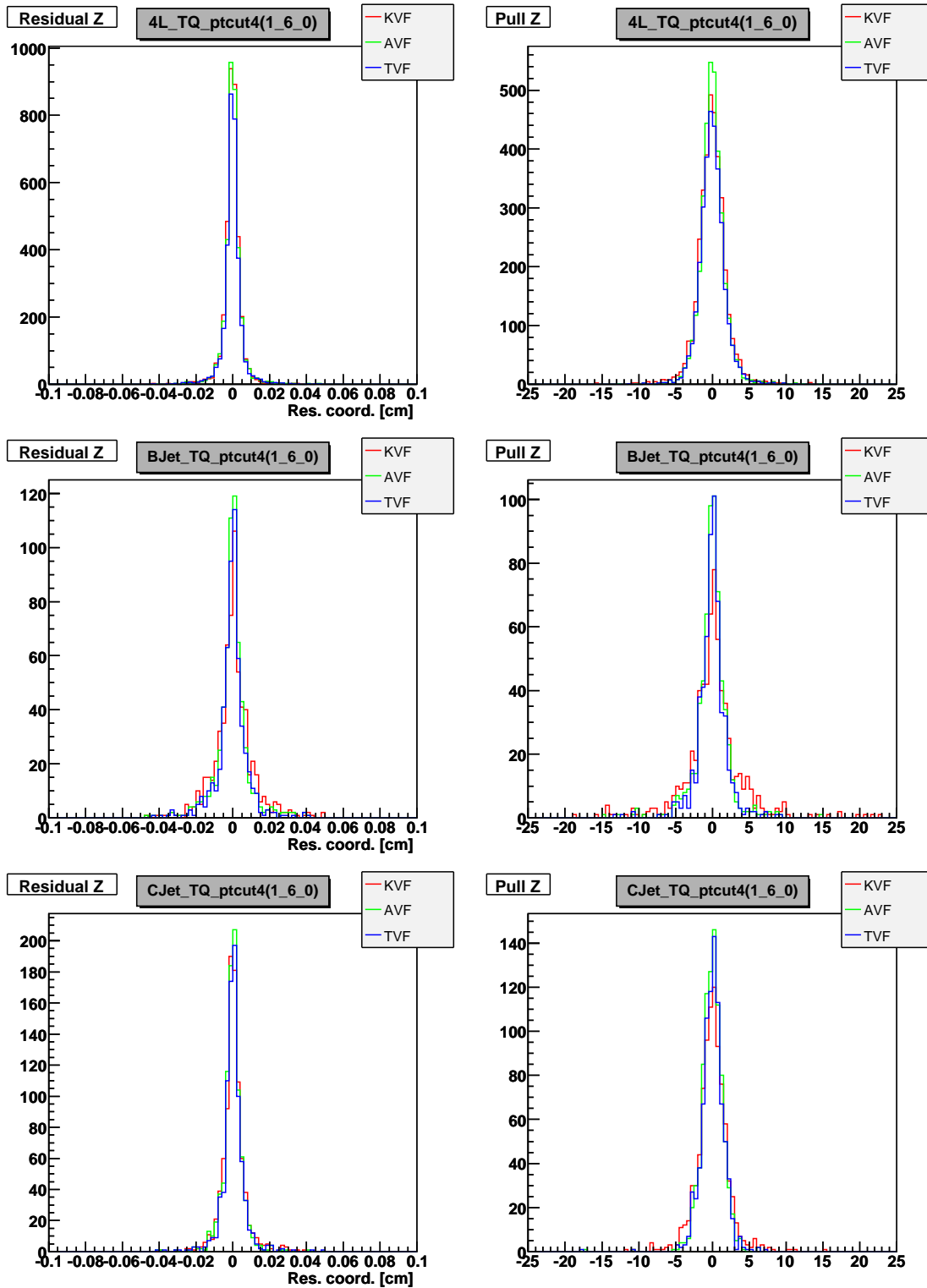


Figura 5–10: Histogramas del Resz y Pullz para  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l, BJet50 - 120GeV$  y  $CJet50 - 120GeV$  con los distintos ajustes KVF, AVF y TVF aplicando un TQ con  $minpt > 4$  para la versión CMSSW 1.6.0.

# CAPÍTULO 6

## CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 6.1 Conclusiones

En esta tesis se realizaron la implementación y validación del TVF, así como la optimización del TQ para la reconstrucción de vértices primarios de CMSSW. La validación se realizó tomando los distintos algoritmos de ajuste para la reconstrucción de vértices primarios, en los decaimientos  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ,  $BJet$  y  $CJet$ . Los resultados obtenidos nos dieron las siguientes conclusiones:

- Al realizar la validación del TVF se pudo observar que los resultados obtenidos para los  $Res$  y los  $Pull$  muestran valores muy próximos al algoritmo por defecto AVF y mejores al de mínimos cuadrados KVF lo cual indica que el TVF puede ser usado en caso que el AVF no funcione como se espera en la reconstrucción. El TVF se encuentra implementado en el CVS de CMSWW a partir de la versión *CMSSW170pre2*. Sin embargo, todavía no se utiliza en la producción de vértices primarios.
- Al aplicar un TQ a la selección de trazas para la producción de vértices primarios para distintos valores del  $minpt$  se pudo observar que la reconstrucción de vértices primarios mejora notablemente al aplicar TQ con un  $minpt > 0$ . El TQ se encuentra implementado en el CVS de CMSWW a partir de la versión *CMSSW180pre8* como un filtro por defecto para la reconstrucción de vértices primarios.

- Los resultados obtenidos para el  $Res_x$  en el plano transversal son más precisos que la del eje  $z$ . Esto se debe a que el plano transversal tiene una resolución del orden de  $\mu m$  mientras que el eje  $z$  tiene un resolución mayor.
- Los resultados obtenidos para los  $Pull_x$  y  $Pull_z$  muestran que el valor de la incertidumbre de la reconstrucción  $\sigma_{Rec}$  está subestimada; esto se debe a que los valores de los  $Pull$  fueron mayores que 1.

## 6.2 Trabajos Futuros

Como trabajos futuros se tiene:

- La implementación de TVF como parte del paquete de producción de vértices primarios en CMSWW. Para esto se seguirá la validación y optimización del TVF en las distintas versiones de CMSWW posteriores a la mostrada en esta tesis.
- También se encuentra pendiente incluir en el ajuste TVF que el vértice primario sea parte de la línea del haz (“*beamspot*”).
- Por otra parte está la implementación de un filtro para distinguir entre electrones y muones en el decaimiento de 4 leptones.

# APÉNDICES

# APÉNDICE A

## CÓDIGO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL "TRACK QUALITY"

Este es el código del TQ utilizado en *CMSSW160* en el modulo *PrimaryVertexProducer*:

Clase *TrackFilterForPVFinding.h* se encuentra el en directorio *interface*.

---

```
#ifndef TrackFilterForPVFinding_h
#define TrackFilterForPVFinding_h

/**\class TrackFilterForPVFinding
Description: selects tracks for primary vertex reconstruction
*/

#include "TrackingTools/TransientTrack/interface/TransientTrack.h"
#include "FWCore/ParameterSet/interface/ParameterSet.h"

class TrackFilterForPVFinding {
public:
    TrackFilterForPVFinding(const edm::ParameterSet& conf);

    bool operator() (const reco::TransientTrack & tk) const;

    float minPt() const;

    float maxnormalizedChi2() const;
    float m_cutTotalHits() const;
    float m_cutPixelHits() const;

    float maxD0Significance() const;

private:
    edm::ParameterSet theConfig;
};

#endif
```



Clase *TrackFilterForPVFinding.cc* se encuentra el en directorio *src*.

---

```

#include "RecoVertex/PrimaryVertexProducer/interface/TrackFilterForPVFinding.h"
#include <cmath>

TrackFilterForPVFinding::TrackFilterForPVFinding(const edm::ParameterSet& conf)
    : theConfig(conf) {}

bool
TrackFilterForPVFinding::operator() (const reco::TransientTrack & tk) const
{
    bool signi = tk.stateAtBeamLine().transverseImpactParameter().significance() <
    maxD0Significance();
    bool ptcut = tk.impactPointState().globalMomentum().transverse() > minPt();
    bool norchi2 = tk.normalizedChi2() < maxnormalizedChi2(); // normalized chi2
    bool nThit = tk.hitPattern().numberOfValidHits() >= m_cutTotalHits(); // min num tracker hits
    bool nminhitPix = tk.hitPattern().numberOfValidPixelHits() >= m_cutPixelHits(); //min # pix hits
    //return (signi && ptcut && norchi2 && nThit && nminhitPix); //&& pdgid);
    return tk.stateAtBeamLine().transverseImpactParameter().significance() < maxD0Significance();
}

float TrackFilterForPVFinding::minPt() const
{
    return theConfig.getParameter<double>("minPt");
}

float TrackFilterForPVFinding::maxnormalizedChi2() const
{
    return theConfig.getParameter<double>("maxnormalizedChi2");
}

float TrackFilterForPVFinding::m_cutTotalHits() const
{
    return theConfig.getParameter<double>("m_cutTotalHits");
}

float TrackFilterForPVFinding::m_cutPixelHits() const
{
    return theConfig.getParameter<double>("m_cutPixelHits");
}

```

Archivo de configuración *OfflinePrimaryVerticesFromCTFTracks.cfi* localizada en el directorio *data*.

---

```
module offlinePrimaryVerticesFromCTFTracks = PrimaryVertexProducer
{
  # label of tracks to be used
  string TrackLabel = "ctfWithMaterialTracks"
  bool useBeamConstraint = false
  untracked bool verbose = true
  string algorithm = "AdaptiveVertexFitter"

  PSet TkFilterParameters =
  {
    double minPt = 0. // better for softish events

    double maxnormalizedChi2 = 5.
    double m_cutTotalHits = 8
    double m_cutPixelHits = 2
    #double tvImpcParErr = 0.015

    double maxD0Significance = 5. // keep most primary tracks
  }
  PSet TkClusParameters =
  {
    double zSeparation = 0.1 // 1 mm max separation betw. clusters
  }
  PSet PVSelParameters =
  {
    double maxDistanceToBeam = 0.0200 // 200 microns
    double minVertexFitProb = 0.01 // 1% vertex fit probability
  }
  PSet VtxFinderParameters =
  {
    double minTrackCompatibilityToMainVertex = 0.05 // 5%
    double minTrackCompatibilityToOtherVertex = 0.01 // 1%
    int32 maxNbVertices = 0 // search all vertices in each cluster
  }
}
```

Código del TQ implementado en el CVS de CMSWW a partir de la versión *CMSSW180pre8*.

Clase *TrackFilterForPVFinding.h* se encuentra el en directorio *interface*.

[\[CMSSW\]](#) / [CMSSW](#) / [RecoVertex](#) / [PrimaryVertexProducer](#) / [interface](#) / [TrackFilterForPVFinding.h](#)

Repository:



## View of

[/CMSSW/RecoVertex/PrimaryVertexProducer/interface/TrackFilterForPVFinding.h](#)

[Parent Directory](#) | [Revision Log](#) | [Revision Graph](#)

Revision 1.6 - ([download](#)) ([annotate](#))

Fri Dec 21 22:58:26 2007 UTC (2 months, 3 weeks ago) by yuniceva

Branch: MAIN

CVS Tags:

CMSSW\_1\_8\_0\_pre10, V01-00-04, V01-00-05, V01-00-02, V01-00-03, CMSSW\_2\_0\_0\_pre4, CMSSW\_2\_0\_0\_pre1, CMSSW\_2\_0\_0\_pre2, CMSSW\_2\_0\_0\_pre3,

CMSSW\_1\_8\_0, CMSSW\_1\_8\_0\_pre9, CMSSW\_1\_8\_0\_pre8, HEAD

Changes since 1.5: +2 -1 lines

implement minimal track quality to PV, no pt cut for the moment

```
#ifndef TrackFilterForPVFinding_h
#define TrackFilterForPVFinding_h

/**\class TrackFilterForPVFinding
    Description: selects tracks for primary vertex reconstruction
*/

#include "TrackingTools/TransientTrack/interface/TransientTrack.h"
#include "FWCore/ParameterSet/interface/ParameterSet.h"

class TrackFilterForPVFinding {
public:
    TrackFilterForPVFinding(const edm::ParameterSet& conf);

    bool operator() (const reco::TransientTrack & tk) const;

    float minPt() const;
    float maxD0Significance() const;

private:
    // edm::ParameterSet theConfig;
    float maxD0Sig_, minPt_;
    int minSiHits_, minPxHits_;
    float maxNormChi2_;
};

#endif
```

[CERN LCG CVS service](#)

Powered by [ViewVC 1.0.4](#)

Clase *TrackFilterForPVFinding.cc* se encuentra en el directorio *src*.

[\[CMSSW\]](#) / [CMSSW](#) / [RecoVertex](#) / [PrimaryVertexProducer](#) / [src](#) / [TrackFilterForPVFinding.cc](#)

Repository:



## View of /CMSSW/RecoVertex/PrimaryVertexProducer/src/TrackFilterForPVFinding.cc

[Parent Directory](#) | [Revision Log](#) | [Revision Graph](#)

Revision 1.14 - ([download](#)) ([annotate](#))

Fri Dec 21 22:58:26 2007 UTC (2 months, 3 weeks ago) by yuniceva

Branch: MAIN

CVS Tags:

CMSSW\_1\_8\_0\_pre10, V01-00-04, V01-00-05, V01-00-02, V01-00-03, CMSSW\_2\_0\_0\_pre4, CMSSW\_2\_0\_0\_pre1, CMSSW\_2\_0\_0\_pre2, CMSSW\_2\_0\_0\_pre3, CMSSW\_1\_8\_0, CMSSW\_1\_8\_0\_pre9, CMSSW\_1\_8\_0\_pre8, HEAD

Changes since 1.13: +16 -4 lines

Implement minimal track quality to PV, no pt cut for the moment

```
#include "RecoVertex/PrimaryVertexProducer/interface/TrackFilterForPVFinding.h"
#include <cmath>

TrackFilterForPVFinding::TrackFilterForPVFinding(const edm::ParameterSet& conf)
{
    maxDOSig_ = conf.getParameter<double>("maxDOSignificance");
    minPt_ = conf.getParameter<double>("minPt");
    maxNormChi2_ = conf.getParameter<double>("maxNormalizedChi2");
    minSiHits_ = conf.getParameter<int>("minSiliconHits");
    minPxHits_ = conf.getParameter<int>("minPixelHits");
}

bool
TrackFilterForPVFinding::operator() (const reco::TransientTrack & tk) const
{
    bool IPSigCut = tk.stateAtBeamLine().transverseImpactParameter().significance() < maxDOSig_;
    bool pTCut = tk.impactPointState().globalMomentum().transverse() > minPt_;
    bool normChi2Cut = tk.normalizedChi2() < maxNormChi2_;
    bool nSiHitsCut = tk.hitPattern().numberOfValidHits() > minSiHits_;
    bool nPxHitsCut = tk.hitPattern().numberOfValidPixelHits() > minPxHits_;

    return IPSigCut && pTCut && normChi2Cut && nSiHitsCut && nPxHitsCut;

    //return tk.stateAtBeamLine().transverseImpactParameter().significance() < maxDOSig_;
}

float TrackFilterForPVFinding::minPt() const
{
    return minPt_;
}

float TrackFilterForPVFinding::maxDOSignificance() const
{
    return maxDOSig_;
}
```

[CERN LCG CVS service](#)

Powered by [ViewVC 1.0.4](#)

Archivo de configuración *OfflinePrimaryVerticesFromCTFTracks.cfi* localizada en el directorio *data*.

[\[CMSSW\]/\[CMSSW\]/\[RecoVertex\]/\[PrimaryVertexProducer\]/\[data\]/\[OfflinePrimaryVertices.cfi\]](#)

Repository:



## View of /CMSSW/RecoVertex/PrimaryVertexProducer/data/OfflinePrimaryVertices.cfi

[Parent Directory](#) | [Revision Log](#) | [Revision Graph](#)

Revision 1.4 - ([download](#)) ([annotate](#))  
 Mon Feb 18 10:02:34 2008 UTC (3 weeks, 3 days ago) by *spee*  
 Branch: MAIN  
 CVS Tags: V01-00-05, CMSSW\_2\_0\_0\_pre4, CMSSW\_2\_0\_0\_pre3, HEAD  
 Changes since 1.3: +1 -1 lines

Remove verbose

```
module offlinePrimaryVertices = PrimaryVertexProducer
{
    # label of tracks to be used
    InputTag TrackLabel = "generalTracks"
    InputTag beamSpotLabel = "offlineBeamSpot"
    bool useBeamConstraint = false
   .untracked bool verbose = false
    string algorithm = "AdaptiveVertexFitter"

    PSet TkFilterParameters =
    {
        double minPt = 0. // better for softish events
        double maxDOSignificance = 5. // keep most primary tracks
        double maxNormalizedChi2 = 5.
        int32 minSiliconHits = 7 // hits > 7
        int32 minPixelHits = 2 // hits > 2
    }
    PSet TkClusParameters =
    {
        double zSeparation = 0.1 // 1 mm max separation betw. clusters
    }
    PSet PVSelParameters =
    {
        double maxDistanceToBeam = 0.0200 // 200 microns
        double minVertexFitProb = 0.01 // 1% vertex fit probability
    }
    PSet VtxFinderParameters =
    {
        double minTrackCompatibilityToMainVertex = 0.05 // 5%
        double minTrackCompatibilityToOtherVertex = 0.01 // 1%
        int32 maxNbVertices = 0 // search all vertices in each cluster
    }
}
```

[CERN LCG CVS service](#)

Powered by [ViewVC 1.0.4](#)

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] David Griffiths, Introduction To Elementary Particles, Wiley, 1987.
- [2] Francis Halzen Alan D. Martin, Quarks and Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics, Wiley, 1984-01.
- [3] M.Gómez-Bock, M. Mondragon, M. Muhlleitner, R. Noriega-Papaqui, I. Pedraza, M. Spira, and P.M. Zerwas. Rompimiento de la simetría electrodébil y la física del Higgs : conceptos basicos. In -, volume 18, page 74. J. Phys. Conf. Ser., 2005.
- [4] Kurt Gottfried and Victor F. Weisskopf, Concepts of Particle Physics Volume I, Oxford University Press, July 1986
- [5] <http://pdglive.lbl.gov/listings1.brl?quickin=Y>, <http://pdg.lbl.gov/>
- [6] <http://palmera.pntic.mec.es/>
- [7] Ian J. R. Aitchison and Anthony. J. G. Hey, Gauge Theories in Particle Physics: A Practical Introduction: Volume 2: QCD and the Electoweak Theory, Institute of Physics Publishing, 3rd edition, 2003.
- [8] <http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/>
- [9] <http://lhc.web.cern.ch/lhc/>
- [10] CMS collaboration, CMS the Compact Muon Solenoid, Technical proposal, CERN/LHCC 94-38 (1994).
- [11] CMS. Detector Performance and Software. Physics Technical Design Report Vol. I.
- [12] CMS. Detector Performance and Software. Physics Technical Design Report, Vol. II.
- [13] <http://www.hep.ph.ic.ac.uk/cms/physics/higgs.html>

- [14] 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.
- [15] A. Strandlie. Filtering, robust and adaptive methods for track reconstruction, Statistical Signal Processing, 2005 IEEE/SP 13th Workshop on, pages 19-24,17-20 July 2005.
- [16] The CMS Tracker Technical Design Report, CERN/LHCC 98-6 CMS TDR 5 Addendum to the CMS Tracker TDR, CERN/LHCC 2000-016
- [17] Waltenberger W 2004 Development of vertex finding and vertex fitting algorithms for CMS PhD Thesis TU Wien, CMS TS-2006/12. See also publications.teilchen.at/ww diss.pdf
- [18] S. Cucciarelli *et al*, Track reconstruction, primary vertex finding and seed generation with the Pixel Detector, CMS NOTE 2006/026.
- [19] 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.
- [20] N. De Filippis. The performance of the CMS tracking. Nucl. Phys. Proc. Suppl., 150:124-127,2006.
- [21] T. Speer, K. Prokofiev, R. Fruhwirth, W. Waltenberger, and P. Vanlaer., Vertex fitting in the CMS tracker. CERN-CMS-NOTE-2006-032.
- [22] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMS/SWGuideVertexFitterMainComponents>
- [23] Wolfgang Waltenberger, Rudolf Frühwirth and Pascal Vanlaer, Adaptive vertex fitting, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 34 N343-N356 doi:10.1088/0954-3899/34/12/N01, 2007
- [24] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMS/SWGuideVertexFitting>
- [25] P. Vanlaer, L. Barbone, N. De Filippis, T. Speer, and O. Buchmuller, F.-P. Schilling., Impact of CMS Silicon Tracker Misalignment on Track and Vertex

Reconstruction. CERN-CMS-NOTE-2006-029.

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

[27] <http://cmsdbs.cern.ch/DBS2-discovery/>



**IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DEL AJUSTE DE RECORTE  
Y DE UN SELECTOR DE TRAZAS CONFIABLES PARA LA  
RECONSTRUCCIÓN DE VÉRTICES PRIMARIOS DEL  
EXPERIMENTO CMS**

Miguel Reinaldo Bonnett Del Alamo  
Departamento de Física  
Consejero: Juan Eduardo Ramírez  
Grado: Maestría en Ciencias  
Fecha de Graduacion: Mayo 2008