

ESTUDIO DE MULTIPLICIDAD DE JETS, EN COLISIÓN PROTÓN-PROTÓN A
 $\sqrt{s} = 7$ TeV EN EL EXPERIMENTO CMS DEL LABORATORIO CERN

DIEGO VICENTE BOTINA INSANDARÁ

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
PROGRAMA DE FÍSICA
SAN JUAN DE PASTO
2014

ESTUDIO DE MULTIPLICIDAD DE JETS, EN COLISIÓN PROTÓN-PROTÓN A
 $\sqrt{s} = 7$ TeV EN EL EXPERIMENTO CMS DEL LABORATORIO CERN

DIEGO VICENTE BOTINA INSANDARÁ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE FÍSICO

DIRECTOR:

MSc. Jaime Betancourt

CODIRECTOR:

PhD. Bernardo Gomez

UNIVERSIDAD DE NARIÑO

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

PROGRAMA DE FÍSICA

SAN JUAN DE PASTO

2014

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

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

Nota de aceptación

Msc. Jaime Betancourt.
Asesor.

Phd. Bernardo Gomez
Coasesor.

Phd. Juan Bautista Flores
Jurado.

Phd. Alvaro Rugeles Perez
Jurado.

San Juan de Pasto, abril 2014

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por el don de la vida, sus esfuerzos y sacrificios para darme educación.

Agradezco la colaboración imprescindible de aquellas personas quienes aportaron de manera incondicional en el desarrollo del proyecto, y en mi formación como profesional; ya que sin su ayuda no hubiera sido posible cumplir con las metas fijadas.

A los docentes Jaime Betancourt, Andres Osorio y David Martinez por sus esfuerzos y dedicación, sus conocimientos, sus orientaciones, su manera de trabajar, su persistencia, su paciencia y su motivación que han sido fundamentales para mi formación.

Diego Vicente Botina Insandar

RESUMEN

El detector de partículas COMPACT MUON SOLENOID (CMS)¹ está en funcionamiento desde el año 2010, desde entonces, se han generado una gran cantidad de datos, que vienen acompañados de background. Para corregir los datos por background, uno de los métodos más usados es la simulación computacional.

En este trabajo se realiza una simulación computacional de colisión protón-protón a $\sqrt{s} = 7$ TeV para obtener la reconstrucción de jets para el canal con estados finales de par de leptones y muones, con el fin de analizar variables cinemáticas como la energía transversal faltante y momento transversal. Para esto hacemos uso de los programas Pythia², Fastjet³ y Root⁴.

¹<http://cms.web.cern.ch/news/what-cms>

²<http://home.thep.lu.se/~torbjorn/Pythia.html>

³<http://www.lpthe.jussieu.fr/~salam/fastjet>

⁴<http://root.cern.ch/drupal/content/users-guide>

ABSTRACT

The particle detector COMPACT MUON SOLENOID (CMS)⁵ in operation since 2010, since then, it has generated a lot of data, which has a component of different types of background. To correct the data for background, one of the most used methods is the simulation.

In this work has been done a simulation of proton-proton collision to $\sqrt{s} = 7$ TeV to analyze the channel with leptons in final states , in order to understand kinematic variables as missing transverse energy and transverse momentum. For this we use the Pythia⁶, Fastjet⁷ and Root⁸. programs

⁵<http://cms.web.cern.ch/news/what-cms>

⁶<http://home.thep.lu.se/~torbjorn/Pythia.html>

⁷<http://www.lpthe.jussieu.fr/~salam/fastjet>

⁸<http://root.cern.ch/drupal/content/users-guide>

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1. MARCO TEÓRICO	16
1.1. MODELO ESTÁNDAR (ME)	16
1.2. SUPERSIMETRÍA (SUSY)	18
1.3. LARGE HADRON COLLIDER (LHC)	19
1.4. COMPACT MUON SOLENOID (CMS)	22
1.4.1. Detector de trayectoria	23
1.4.2. Calorímetro Electromagnético (ECAL)	24
1.4.3. Calorímetro Hadronico (HCAL)	24
1.4.4. Detectores de muones	25
1.5. ENERGÍA TRANSVERSAL FALTANTE	25
1.6. JETS	26
2. SIMULACIÓN DEL CANAL DE ESTUDIO	27
2.1. PYTHIA 8	27

2.2. ROOT	28
2.3. ALGORITMOS DE RECONSTRUCCIÓN DE JETS	28
2.3.1. Cono iterativo	29
2.3.2. Cono de punto medio	29
2.3.3. Algoritmo k_T	30
2.4. FASTJET	30
3. RESULTADOS	31
3.1. ENERGÍA TRANSVERSAL FALTANTE	31
3.2. RECONSTRUCCIÓN DE JETS	35
3.3. MASA INVARIANTE	38
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
ANEXOS	42
3.4. PROGRAMAS UTILIZADOS EN LA SIMULACIÓN	43
3.4.1. PYTHIA 8	43
3.4.2. FASTJET	44
ANEXOS	44

LISTA DE CUADROS

1.1. Características generales del CMS 22

2.1. Parámetros mSugra 28

LISTA DE FIGURAS

1.	Canal de estudio elegido	14
1.1.	Modelo Estándar de Partículas.	16
1.2.	Partículas supersimétricas.	18
1.3.	Estructura del LHC	19
1.4.	Parámetros del LHC.	20
1.5.	COMPACT MUON SOLENOID (CMS)	22
1.6.	Sección transversal del detector CMS.	23
2.1.	Evento de multijets a 7 TeV.	28
3.1.	(a)Energía centro de masa partónico y (b) Velocidad centro de masa partónico	31
3.2.	E_T parte superior canal	32
3.3.	E_T parte inferior del canal	32
3.4.	Separación angular entre $\tilde{\chi}_1^0$ y W^-	32
3.5.	Separación angular entre e^- y $\bar{\nu}_e$	32
3.6.	Separación angular entre \tilde{g} y $\tilde{\chi}_1^-$	33
3.7.	Separación angular entre \tilde{g} y jet 1	33
3.8.	Separación angular entre \tilde{g} y jet 2	33
3.9.	Separación angular entre \tilde{g} y \tilde{q}	33
3.10.	Separación angular entre \tilde{g} y W^-	34

3.11. Separación angular entre $\tilde{\chi}_2^0$ y $\tilde{\chi}_1^0$	34
3.12. Separación angular entre $\tilde{\chi}_2^0$ y Z_0	34
3.13. Separación angular entre μ^+ y μ^-	35
3.14. Separación angular entre \tilde{q} y $\tilde{\chi}_2^0$	35
3.15. Separación angular entre \tilde{q} y jet	35
3.16. Gráficas de (a) momento transversal, (b) ángulo ϕ , (c) psedorapidez η y $\eta\phi$ del primer jet	36
3.17. Gráficas de (a) momento transversal, (b) ángulo ϕ , (c) psedorapidez η y $\eta - \phi$ del segundo jet	37
3.18. Gráficas de (a) momento transversal, (b) ángulo ϕ y (c) psedorapidez η jet parte inferior	38
3.19. Masa invariante de muones	39
3.20. Masa invariante e^- y $\bar{\nu}_e$	39
3.21. Generación de evento en pythia 8	43

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A.	42
ANEXO B.	44

GLOSARIO

Background: Señal no deseada proveniente del Modelo Estándar o de efectos del detector.

Centelleo: Propiedad de un material de emitir luminiscencia cuando por él pasa radiación ionizante

Fotodetector: Sensor que genera una señal eléctrica dependiente de la luz u otra radiación electromagnética que recibe.

Jet: Chorro de partículas originadas por la hadronización de partones.

Luminosidad: Número de partículas por unidad de superficie y por unidad de tiempo en un haz.

Momento transversal: La cantidad de momento de la partícula perpendicular a la dirección del haz.

INTRODUCCIÓN

En la medida en que se fueron desarrollando mejores tecnologías y formulando nuevas teorías, para explicar la estructura interna de la materia, especialmente en los años 1970 se formuló una teoría cuántica de campos denominada **Modelo Estándar de Partículas (ME)**⁹. El ME unifica tres de las 4 interacciones fundamentales: la electromagnética, la nuclear débil y la nuclear fuerte. Este modelo ha prevalecido a las distintas pruebas experimentales en los diferentes aceleradores de partículas. De acuerdo con ME toda la materia esta constituida por un pequeño número de partículas fundamentales llamadas *leptones*(l) y *quarks*(q). Sin embargo el ME¹⁰ presenta muchas dificultades entre las cuales tenemos: el problema de la jerarquía de masas, no explica el desequilibrio que hay entre la cantidad de materia y anti-materia, contiene muchos parámetros y constantes que deben ser determinados experimentalmente o ser ajustados para que funcionen, no incluye los efectos de la cuarta fuerza (*gravitacional*), no explica la composición de la materia oscura,¹¹ etc. Adicionalmente en teoría las partículas adquieren masa a través del mecanismo de Higgs.¹² ¹³ El Higgs es un campo escalar que aún no ha sido detectado.

Una extensión del ME debe ser consistente con todos los datos experimentales y hacer predicciones a una escala de 1 TeV. Uno de los modelos más relevantes para nuevos desarrollos es la SUPERSIMETRÍA (SUSY)¹⁴ ¹⁵ en donde se incluye una nueva familia de partículas, que resulta de asignar a cada partícula elemental del ME una supercompañera, la que difiere en su spin s por $s + \frac{1}{2}$.

⁹Nagashima, Yorikiyo, Elementary Particle Physics Vol. 1, WILEY-VCH Verlag GmbH Co. KGaA. 2010, pag.7-11

¹⁰Perkins, Donald H. Introduction to High Energy Physics Four Edition, Cambridge University Press 2000, pag. 12, 276

¹¹Martin, B.R. Shaw, G. Particle Physics, third edition, John Wiley & Sons Ltd, 2008, pag. 320

¹²Gómez Camacho, Joaquín. Partículas Elementales, junio 6, 2001, pag. 102

¹³Griffiths, David. Introduction to Elementary Particles. Jhon Wiley & Sons, INC. 1987, pag. 365

¹⁴Martin, B.R. Shaw, G. Particle Physics, third edition, John Wiley & Sons Ltd, 2008, pag. 314

¹⁵Perkins, Donald H. Introduction to High Energy Physics Four Edition, Cambridge University Press 2000, pag. 277



En este trabajo se pretende simular uno de los tantos canales que se pueden producir

17

por cada colisión, en particular el indicado en la figura 1 relacionado con la teoría SUSY, adicionalmente haremos estudios de multiplicidad de los jets. Se espera que las señales resultantes esten constituidas por jets, leptones(muones, e^- , ν_e) y energía transversal faltante (E_t).

Para simular el canal de la Figura 1 haremos uso de un generador de eventos (Pythia 8), al mismo tiempo determinamos momento transversal (P_t), angulo azimutal (ϕ) y pseudorapidez (η) de los jets, usando el programa Fastjet , adicionalmente realizaremos estudios estadísticos de las variables cinemáticas de momento transversal faltante (P_t) y energía transversal faltante (E_t), usando el programa Root. Todo este proceso se realiza teniendo en cuenta las características del detector CMS involucrado dentro del LHC.

1 MARCO TEÓRICO

1.1. MODELO ESTÁNDAR (ME)

El ME ¹ es una teoría exitosa y puede explicar todos los fenómenos en el micromundo de las partículas de una manera sencilla y unificada, al menos en principio. Algunos de los aspectos más importantes de este modelo son:

- Es una teoría cuántica de campos, es una teoría gauge y es renormalizable.
- Las partículas elementales de la materia son los quarks y los leptones.
- Existen 3 generaciones o familias de quarks y leptones. Como se muestra en la figura 1.1

Three Generations of Matter (Fermions)			
	I	II	III
mass →	3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
name →	up	charm	top
Quarks	6 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom
	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	<0.19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	<18.2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino
Leptons	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electron	106 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	1.78 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tau
Bosons (Forces)			
			0 0 1 γ photon
			0 0 1 g gluon
			90.2 GeV 0 1 Z^0 weak force
			80.4 GeV ± 1 1 W^\pm weak force

Figura 1.1: Modelo Estándar de Partículas. Tomado de <http://espanamasricamundo.blogspot.com/2011/12/el-boson-de-higgs>

El universo visible esta compuesto por electrones y quarks (u, d) que son partículas estables que conforman a los protones y neutrones. Los quarks s, c, b, t forman partículas

¹Enberg, Rikard. Quantum Chromodynamics and Colour Singlet Exchange in High Energy Interactions, Printed in Sweden by Eklundshofs Grafiska AB, Uppsala 2003, cap. 1 y 2.

similares al protón y neutrón pero de masa superior, sin embargo éstas son inestables y decaen rápidamente (alrededor de $10^{-13}s$) hacia combinaciones ud , al igual que los leptones pesados que decaen a e . Sólo en colisiones de altas energías producidas en aceleradores o en los rayos cósmicos son observadas estas variedades de partículas pesadas.

En la naturaleza hay cuatro interacciones fundamentales, o fuerzas básicas, que afectan toda la materia, éstas son:

Interacción Fuerte: Mantiene unidos a los quarks dentro de los protones y neutrones mediante el intercambio de bosones llamados *gluones* y no es eficaz más allá de la distancia nuclear.

Interacción Electromagnética: Actúa sobre partículas cargadas eléctricamente, es la responsable de mantener unidos a los átomos, es mediada por *fotones*.

Interacción Débil: Es la responsable del cambio del sabor de los quarks, un ejemplo típico de esta interacción es el decaimiento β ². Los bosones W^\pm y Z^0 son las partículas mediadoras.

Interacción Gravitacional: Es una fuerza atractiva entre dos cuerpos, por ser de largo alcance gobierna el movimiento de planetas y galaxias, el bosón asociado que media esta interacción es el *graviton*.

El ME posee limitaciones, por cuanto la última fuerza no ha sido incluida dentro de esta teoría. Además, existen inquietudes en cuanto al por qué hay tres generaciones de quarks y leptones. Un fenómeno que va más allá de este modelo es la oscilación de neutrinos³, en la que un neutrino de una clase se transforma en otro mientras se propaga.

²Perkins, Donald H. Introduction to High Energy Physics Four Edition, Cambridge University Press 2000, pag. 197

³Martin, B.R. Shaw, G. Particle Physics, third edition, John Wiley & Sons Ltd, 2008, pag.41

1.2. SUPERSIMETRÍA (SUSY)

Particle	Symbol	Spin	Superparticle	Symbol	Spin
Quark	q	$\frac{1}{2}$	Squark	\tilde{q}	0
Electron	e	$\frac{1}{2}$	Selectron	\tilde{e}	0
Muon	μ	$\frac{1}{2}$	Smuon	$\tilde{\mu}$	0
Tauon	τ	$\frac{1}{2}$	Stauon	$\tilde{\tau}$	0
<hr/>					
W boson	W	1	Wino	\tilde{W}	$\frac{1}{2}$
Z boson	Z	1	Zino	\tilde{Z}	$\frac{1}{2}$
Photon	γ	1	Photino	$\tilde{\gamma}$	$\frac{1}{2}$
Gluon	g	1	Gluino	\tilde{g}	$\frac{1}{2}$
Higgs	H	0	Higgsino	\tilde{H}	$\frac{1}{2}$

Figura 1.2: Partículas supersimétricas. Imagen tomada de: Martin, B.R. Shaw, G. Particle Physics, third edition, John Wiley & Sons Ltd, 2008, pag. 314

La supersimetría ⁴ es una simetría que conecta fermiones con bosones, de acuerdo con esto, cada partícula elemental tiene un compañero supersimétrico, el cual se parece en todos los aspectos excepto en su espín. Los supercompañeros de los fermiones son nombrados adicionando el prefijo “s” al nombre del fermión (squark), mientras los supercompañeros de los bosones son nombrados al adicionar la terminación “ino” a la raíz del nombre normal (gluon → gluino).

A energías menores de un TeV, no se ha logrado observar tales partículas supersimétricas, en consecuencia se dice que la supersimetría está rota en estos valores ⁵ y de aquí surge la posibilidad de encontrar las partículas supersimétricas en el LHC⁶, cuyo valor máximo de energía esperado es de 14 TeV.

Al aplicar una supersimetrización directa sobre el ME se genera lo que se conoce como Modelo Estándar Supersimétrico Mínimo (**MSSM**⁷)⁸, en consecuencia las partículas

⁴Martin, Stephen P. A Supersymmetry Primer, arXiv:hep-ph/9709356v5, pag. 5

⁵Drees, Manuel. An Introduction to Supersymmetry, arXiv:hep-ph/9611409v1, pag. 18

⁶Martin, Stephen P. A Supersymmetry Primer, arXiv:hep-ph/9709356v5, pag. 88

⁷Por sus siglas en inglés Minimal Supersymmetric Standard Model

⁸Drees, Manuel. An Introduction to Supersymmetry, arXiv:hep-ph/9611409v1, pag. 21

del ME tendrán sus supercompañeras mostradas en la tabla 1.2.

1.3. LARGE HADRON COLLIDER (LHC)

El LHC⁹ es un acelerador de partículas ubicado en la frontera entre Francia y Suiza, que hace colisionar haces de hadrones en direcciones opuestas en 4 puntos. Tiene una circunferencia aproximada de 27 km, a una profundidad de 100 metros en promedio, cuenta con un sistema de refrigeración para mantener una temperatura de 1,9 K, para hacer funcionar cerca de 9600 electroimanes que son responsables de curvar y enfocar los haces. En pleno funcionamiento llegará a una energía de 7 TeV por haz, a una luminosidad de $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$; produciendo 600 millones de colisiones por segundo, además las colisiones llegarán a temperaturas 100.000 veces mas calientes que en el interior del sol.

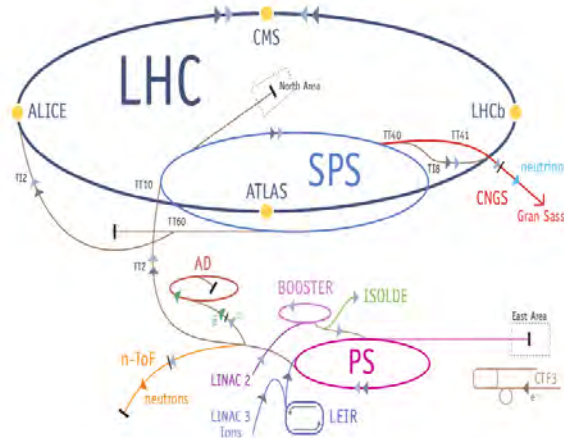


Figura 1.3: Estructura del LHC. Imagen tomada de: CERN faq LHC the guide, Communication Group, February 2009 CERN-Brochure-2009-003-Eng, pag. 12

En la figura 1.3 se indica la estructura¹⁰ y los parámetros del LHC son señalados en la figura 1.4. Los protones son acelerados a una energía de 50 MeV en el linac 2, luego pasan al Proton Synchrotron Booster (PSB) donde incrementan su energía hasta alcanzar los 1.4 GeV, a continuación llegan al Proton Synchrotron (PS) para alcanzar los 25 GeV, enseguida son transferidos al Super Proton Synchrotron (SPS) que los acelera a una energía de 450 GeV, cuando ocurre esto, arriban al anillo principal del LHC para tomar

⁹<http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/>

¹⁰CERN faq LHC the guide, Communication Group, February 2009 CERN-Brochure-2009-003-Eng, pag. 12

direcciones contrarias y adquirir una energía de 7 TeV.

		<i>pp</i>	HI	
Energy per nucleon	E	7	2.76	TeV
Dipole field at 7 TeV	B	8.33	8.33	T
Design Luminosity*	\mathcal{L}	10^{34}	10^{27}	$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
Bunch separation		25	100	ns
No. of bunches	k_B	2808	592	
No. particles per bunch	N_p	1.15×10^{11}	7.0×10^7	
Collisions				
β -value at IP	β^*	0.55	0.5	m
RMS beam radius at IP	σ^*	16.7	15.9	μm
Luminosity lifetime	τ_L	15	6	hr
Number of collisions/crossing	n_c	≈ 20	–	

Figura 1.4: Parámetros del LHC. Imagen tomada de: CMS Physics, Volume I: Detector Performance and Software, CERN/LHCC 2006-001, CMS TDR 8.1. pag. 2

Los resultados del LHC ayudará a resolver inquietudes tales como:

- Energía oscura
- Materia oscura
- Dimensiones extras
- El Higgs
- Supersimetría

Todo esto lo llevará a cabo utilizando los 6 experimentos que están ubicados en los puntos de colision de los haces, descritos a continuacion:

- **A Large Ion Collider Experiment (ALICE)**¹¹: Es un detector especializado en las colisiones de iones de plomo, analiza las propiedades de un estado de la materia denominado plasma quark-gluón, en el que bajo condiciones de alta temperatura y densidad, los quarks y gluones no estaban confinados dentro de hadrones; existiendo probablemente justo después del Big Bang.

¹¹<http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/ALICE-en.html>

- **A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)**¹²: Es un detector de propósitos generales al igual que el CMS, buscará por ejemplo: indicios del bosón de Higgs, de materia oscura y dimensiones extras. Para ello tiene un sistema para registrar la trayectoria, la energía y la identidad de las partículas producidas en las colisiones del LHC.
- **Large Hadron Collider beauty (LHCb)**¹³: Es un experimento diseñado para estudiar la física del quark b, con el fin de entender la leve asimetría entre materia y anti-materia.
- **Large Hadron Collider forward (LHCf)**¹⁴: Utiliza las partículas generadas muy cerca del haz de protones para simular los rayos cósmicos en condiciones de laboratorio. Está ubicado cerca del detector ATLAS.
- **TOTal Elastic and diffractive cross section Measurement (TOTEM)**¹⁵: Ubicado cerca del CMS. Está enfocado en estudiar la física que no sea accesible a los detectores de propósitos generales, entre otras cosas se encarga de medir la sección eficaz de interacción protón-protón y controlar la luminosidad del LHC con gran precisión.

¹²<http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/ATLAS-en.html>

¹³<http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/LHCb-en.html>

¹⁴<http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/LHCf-en.html>

¹⁵<http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/TOTEM-en.html>

1.4. COMPACT MUON SOLENOID (CMS)

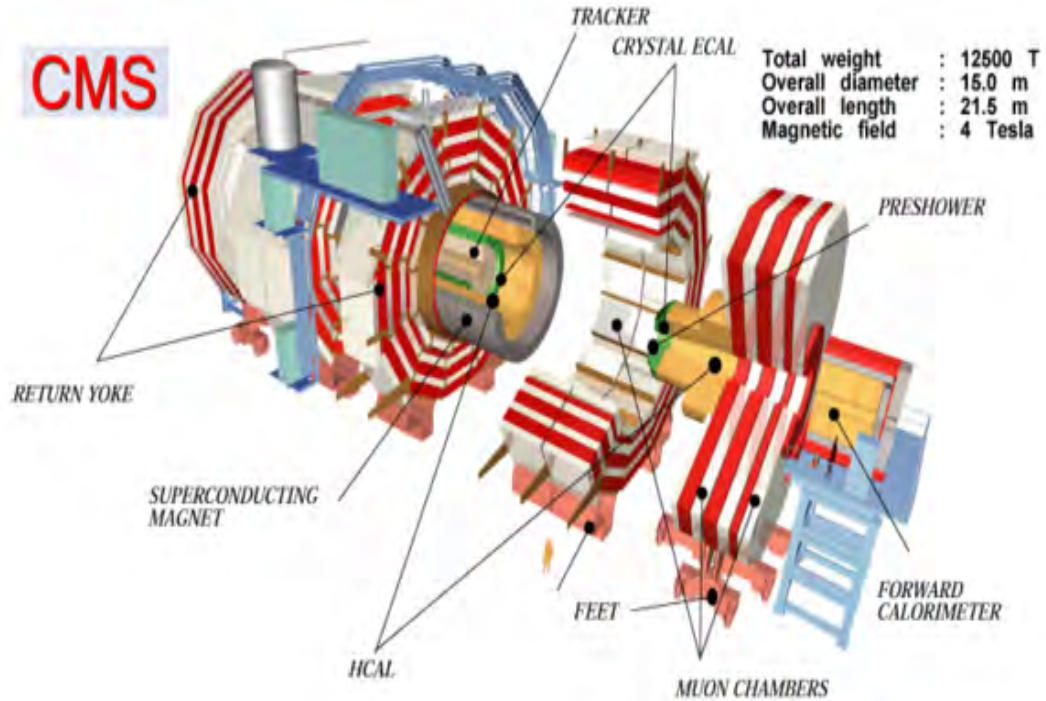


Figura 1.5: COMPACT MUON SOLENOID (CMS). Imagen tomada de <http://cms.web.cern.ch/content/cms-photo-book-and-brochures>

El CMS¹⁶ (Fig. 1.5) es uno de los 6 experimentos que han sido diseñados en el LHC, para detectar una amplia gama de partículas y fenómenos producidos en colisiones de altas energías.

Medidas	Longitud 21 m, ancho 15 m y alto 15 m
Peso	12.500 toneladas
Campo Magnetico	3.8 Teslas
Diseño	Cilindro mas tapas en los extremos
Ubicación	Cessy, Francia

Cuadro 1.1: Características generales del CMS

De forma similar que ATLAS busca obtener resultados en temas como el Boson de Higgs, la supersimetría, la materia oscura y la enegía oscura, además medirá las propiedades de

¹⁶<http://cms.web.cern.ch/news/what-cms>

las partículas anteriormente descubiertas con mas precisión. En la figura 1.6 se muestra la sección transversal del CMS y el sitio en que se detectan las partículas generadas en las colisiones, a continuación se describe sus partes principales:

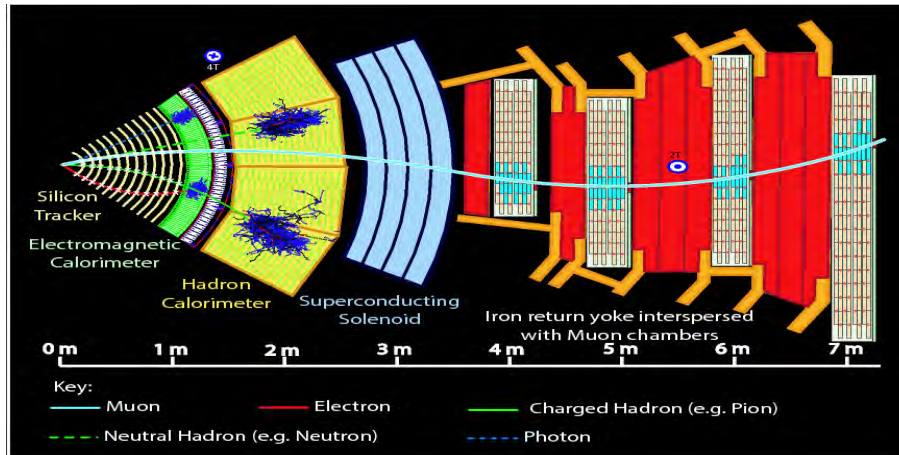


Figura 1.6: Sección transversal del detector CMS. Indica la zona en que las diferentes partículas producen señal, tomada de <https://cms-docdb.cern.ch/cgi-bin/PublicDocDB/ShowDocument?docid=4263>

1.4.1. Detector de trayectoria ^{17 18}

Ubicado en el interior del CMS, es el primero en detectar las partículas ocasionadas por las colisiones de los haces de protones, dependiendo de la cercanía de los eventos se instalan difrentes detectores. Al rastrear el camino recorrido en presencia del campo magnético se calcula el momento de la partícula, la trayectoria mas curvada, indica que la partícula tiene menor momento.

1.4.1.1. Píxeles de silicio

El detector de pixel¹⁹ permite rastrear la trayectoria de partículas que emergen de la colisión con extrema precisión. Es también el más cercano detector al tubo del haz en un radio aproximado de 10 cm, estos tienen una dimensión aproximada de $100\mu m^2$. Sin

¹⁷<http://cms.web.cern.ch/news/tracker-detector>

¹⁸CMS Physics, Volume I: Detector Performance and Software, CERN/LHCC 2006-001, CMS TDR 8.1, pag. 17

¹⁹<http://cms.web.cern.ch/news/silicon-pixels>

embargo, al estar tan cerca de las colisiones significa que el número de partículas que pasan es muy grande.

1.4.1.2. Tiras de silicio

Después de pasar por el tracker y los pixels de silicio, las partículas pasan a través de 10 capas de tiras de silicio²⁰. Los detectores de silicio trabajan de manera similar como los pixel; como una partícula cargada cruza el material golpea electrones de los átomos, produciendo un pequeño pulso de corriente que perdura unos pocos nanosegundos. Esta pequeña cantidad de carga es entonces amplificada.

1.4.2. Calorímetro Electromagnético (ECAL) ^{21 22}

Es especialmente diseñado para medir electrones, positrones y fotones, tiene cristales de tungstato de plomo; estos están hechos primordialmente de metal y es más pesado que el acero inoxidable, es altamente transparente, centellea cuando electrones y fotones pasan a través de él. Esto significa que produce luz en proporción a la energía de la partícula. Los parámetros principales de los calorímetros electromagnéticos son la energía y la resolución de posición para fotones y electrones. La resolución de la energía está determinada a la vez por factores físicos como la fluctuación de pérdida de energía y unos técnicos como la falta de uniformidad de los cristales.

1.4.3. Calorímetro Hadrónico (HCAL) ^{23 24}

En principio el calorímetro hadrónico trabaja en la misma forma como los calorímetros de electrón-fotón, la diferencia principal es que para el calorímetro hadrónico el desarrollo longitudinal es determinado por el promedio de la longitud nuclear de interacción λ_I . El HCAL es un calorímetro de muestreo, significa que encuentra la posición de la partícula, energía y tiempo de llegada usando capas alternadas de materiales de absorción y materiales fluorescentes de centelleo, que produce un rápido pulso de luz cuando

²⁰<http://cms.web.cern.ch/news/silicon-strips>

²¹Grupen, Claus. Schwartz, Boris. Particle Detector second edition, Cambridge University Press 2008, pag. 238

²²<http://cms.web.cern.ch/news/electromagnetic-calorimeter>

²³Grupen, Claus. Schwartz, Boris. Particle Detector second edition, Cambridge University Press 2008, pag. 249

²⁴<http://cms.web.cern.ch/news/hadron-calorimeter>

las partículas lo atraviesan. Fibras ópticas especiales recogen esta luz y se llevan a compartimientos donde los fotodetectores amplifican la señal. Cuando la cantidad de luz en una región dada es sumada a lo largo de muchas capas de placas en lo profundo, llamada "torre", esta cantidad total de luz es una medida de energía de la partícula.

1.4.4. Detectores de muones ²⁵

Los muones son partículas cargadas que son como electrones y positrones, pero son 200 veces más pesados. Debido a que los muones pueden penetrar muchos metros de hierro sin interactuar, a diferencia de otras partículas, no pueden ser detenidas por ningún calorímetro del CMS. Por tanto las cámaras para detectar muones son puestas en el borde del experimento. Uno de los detectores son los tubos de deriva que mide la posición del muon en el detector y otros son las RPC's que cumplen la misma función.

1.5. ENERGÍA TRANSVERSAL FALTANTE

La energía transversal faltante²⁶ es de gran interes en el LHC, debido a que su presencia indicaría la existencia del neutralino, una partícula descrita en los modelos de supersimetría. Aunque habría que hacer un estudio de los datos por cuanto esta variable también es causada por la presencia de neutrinos, de muones o de partículas que interaccionan débilmente.

Para determinar la existencia de partículas que no dejan rastro en el detector, se busca los casos en los cuales no hay conservación de energía (momento) en el plano transversal(plano **x,y**) a la dirección del rayo(eje **z**) (energía(momento) transversal faltante)²⁷ En el CMS el vector energía transversal faltante ²⁸ se determina por:

$$\vec{E}_t^{Miss} = - \sum_n (E_n \sin \theta_n \cos \phi_n \hat{i} + E_n \sin \theta_n \sin \phi_n \hat{j})$$

²⁵<http://cms.web.cern.ch/news/muon-detectors>

²⁶Hubisz, Jay. Lykken, Joseph. Pierini, Maurizio. Spiropulu, Maria. Missing energy look alike with 100 pb⁻¹ at the LHC, arXiv:0805.2398v2 [hep-ph] 30 Jul 2008, pag. 3

²⁷Baden, Andrew R. Jets and Kinematics in Hadronic Collisions, International Journal of Modern Physics A, World Scientific Publishing Company, Revised December 24, 1997, pag. 7

²⁸CMS Physics, Volume I: Detector Performance and Software, CERN/LHCC 2006-001, CMS TDR 8.1, pag. 413

Donde E_n es la energía depositada en los calorímetros, θ_n es el angulo polar y ϕ_n el angulo azimutal. Su estructura permite medir jets y hacer sus reconstrucciones mediante el uso de algoritmos tales como *cono iterativo* y k_t entre otros.

1.6. JETS

Un jet es el resultado de la hadronización de partones,²⁹ es reconstruido de los depositos de energía en las celdas de los calorímetro y para ello es necesario el uso de algoritmos. Los algoritmos de jets se basan en la combinación de objetos que son cercanos el uno del otro. El algoritmo es un conjunto de reglas matemáticas de como llevar a cabo dos pasos distintos. El primer paso opera evento por evento, sobre la lista de cuadvectores, el cual describe bien el estado perturbativo. El segundo paso especificado por el algoritmo, nos dice como construir cantidades cinemáticas apropiadas de cada sublista, con el fin de describir las propiedades cinemáticas individuales de los jets.

CMS utiliza torres de calorímetros proyectados en una malla de $\delta\eta \times \delta\phi = 0,1 \times 0,1$, como aporte a la busqueda de jet. Las torres corresponden a cuadvectores sin masa, por definición, esto es, su contribución cinemática es completamente especificada por su momento transversal P_T , el ángulo azimutal ϕ y su pseudorapidez η , definida por:

$$\eta = -\ln \tan \left(\frac{\theta}{2} \right)$$

La tecnica de recontrucción del flujo de energía combina una trayectoria con la respuesta del calorímetro y hace uso de la caracteristica que el track provee una resolución de energía mucho mejor que el calorímetro para partículas de energía mas bajas.

La recontrucción de jets, es en general afectada por los efectos del campo magnético, las pérdidas crecientes de energía de los materiales rotos, regiones de baja eficiencia en los calorímetros, fugas y restos de los choques entre protones.

²⁹ Ellis S. D.,Huston J., Hatakeyama K., Loch P., Tonnesmann M.,Jets in Hadron-Hadron Collisions, arXiv:0712.2447v1 [hep-ph], pag. 2-6

2 SIMULACIÓN DEL CANAL DE ESTUDIO

En el proceso de simulación del canal requirio el uso de los programas descritos a continuación, en el apendice A está una breve descripción de la forma en que se los puede utilizar.

2.1. PYTHIA 8

Es un programa de simulación de colisiones de partículas trabaja bajo lenguaje C++, permite fijar la energía de centro de masa, la clase de partículas que chocan, calcular energía y momento de partículas resultantes. Maneja entre otros procesos¹: QCD, Higgs, supersimetría, dimensiones extras. En el caso de la supersimetría tiene:

- Producción de pares gluinos
- Producción de squark-gluino
- Producción de pares squark
- Producción de pares neutralino y chargino
- Producción de neutralino/chargino + squark/gluino
- Producción de slepton
- Decaimiento de partículas susy

Para generar eventos con supersimetría Pythia 8 hace uso de un archivo(.slha²) externo en donde están fijados los parámetros mSugra³ sus valores son mostrados en la siguiente cuadro

¹<http://home.thep.lu.se/~torbjorn/Pythia.html>

²siglas de SUSY Les Houches Accord

³minimal super gravit

m_0	$m_{1/2}$	$\tan\beta$	$\text{signo}(\mu)$	A_0
185	350	35	+	0

Cuadro 2.1: Parámetros mSugra

En la cual m_0 es la masa común para todos los escalares, $m_{1/2}$ es la masa común para todos los fermiones, $\tan\beta$ es la razón entre los valores de expectación en el vacío de los dobletes de Higgs, $\text{signo}(\mu)$ es el parámetro de masa de los higgsinos y A_0 es el acoplamiento trilineal.

2.2. ROOT

Root⁴ es un programa diseñado para efectuar tareas de almacenamiento y análisis de datos. Para la simulación se empleó la creación de histogramas, para guardar los eventos del choque de hadrones generados por pythia 8 se usó archivos root.

2.3. ALGORITMOS DE RECONSTRUCCIÓN DE JETS

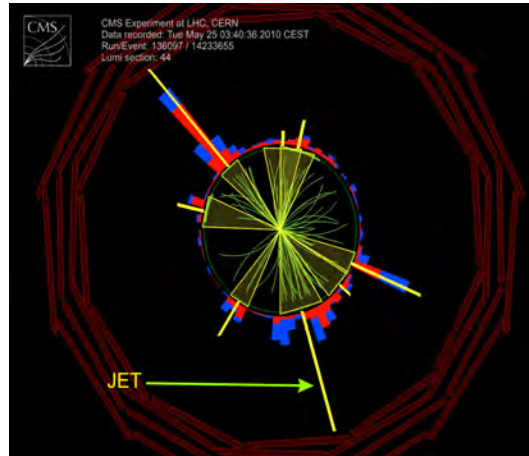


Figura 2.1: Evento de multijets a 7 TeV, los jets corresponden a las líneas amarillas. Tomado de: <https://cds.cern.ch/record/1369199>

Dado que los jets son una evidencia de la producción de quarks y gluones, figura 2.1, su estudio es útil para buscar física más allá del modelo estándar. Se requiere encontrar

⁴<http://root.cern.ch/drupal/content/users-guide>

métodos para hallar su energía, momento, entre otras variables y determinar su procedencia, es así como se han creado los algoritmos de reconstrucción de jets. En el detector CMS principalmente hacen uso de⁵: cono iterativo, cono de punto medio y el algoritmo k_T , los cuales para adicionar cada uno de los componentes se usa el esquema de la energía, de esta manera los constituyentes son simplemente sumados como cuadvectores produciendo jets masivos.

2.3.1. Cono iterativo En el algoritmo de cono iterativo, se crea una lista ordenada de E_T de los objetos de entrada(partículas o torres de calorímetros). Un cono de medida $R_{cone} = \sqrt{(\delta\eta)^2 + (\delta\phi)^2}$ en el que η es la pseudorapidez y ϕ es el ángulo azimutal, se proyecta sobre los objetos con mayor energía transversal sobre un límite fijado. Con el esquema E_T se calcula la dirección y energía de un "proto-jet" con los objetos dentro del cono. Este procedimiento se sigue hasta conseguir un proto-jet estable, cuando esto ocurre los objetos que lo forman son retirados de la lista de entrada y el proto-jet se adiciona a la lista de jets. Todo el proceso concluye cuando no haya más objetos en la lista de E_T .

2.3.2. Cono de punto medio El algoritmo de punto medio de cono fue diseñado para facilitar separación y fusión de jets. El algoritmo de punto medio de cono también usa un procedimiento iterativo para encontrar conos estables(proto-jets) apartir de conos alrededor de objetos con un E_T fijado. En este algoritmo ningún objeto es retirado de la lista de entrada, puede resultar en que un objeto de entrada sea parte de muchos proto-jets. Para asegurar la correcta aplicación del algoritmo, una segunda iteration de la lista de jets estables es hecha. Para cada par de proto-jets cuya separación sea menor que el diametro del cono, un punto medio es calculado en la dirección del momento combinado. Al encontrar todos los proto-jets, la separación y procedimiento de fusión es aplicado, a partir de la mayor E_T de proto-jet. Si el proto-jet no comparte objetos con otros proto-jets, es definido como un jet y es eliminado de la lista de proto-jet. De lo contrario se compara la energía transversal compartida de los proto-jets y si la fracción es superior al 50 % se fusionan. Este algoritmo implementa el esquema de energía para calcular las propiedades del proto-jet .

⁵CMS Physics, Volume I: Detector Performance and Software, CERN/LHCC 2006-001, CMS TDR 8.1. pag 407-409

2.3.3. Algoritmo k_T El algoritmo k_T es un algoritmo de jet basado en cluster. El procedimiento de cluster comienza con una lista de objetos de entrada, partículas estables o celdas de calorímetros. A cada objeto i y cada par (i,j) ($i \neq j$) las siguientes distancias son encontradas:

$$d_i = (E_{T,i})^2 R^2$$

$$d_{ij} = \min\{E_{T,i}^2, E_{T,j}^2\} R_{ij}^2 \quad \text{con } R_{ij}^2 = (\eta_i - \eta_j)^2 + (\phi_i - \phi_j)^2,$$

donde R^2 es un parámetro adimensional normalmente establecido a la unidad. El algoritmo busca la menor d_i o d_{ij} . Si un valor de tipo d_{ij} es el más pequeño, el correspondiente objeto i y j son eliminados de la lista de objetos de entrada. Son mezclados con un esquemas de recombinación y se llenan como un nuevo objeto dentro de la lista de objetos de entrada. Por el contrario si es la distancia d_i la más pequeña, entonces el objeto i es eliminado de la lista de objetos de entrada y pasa a la lista de jets finales. El procedimiento es repetido hasta que todos los objetos son incluidos en jets. El algoritmo sucesivamente combina objetos los cuales tienen una distancia $R_{ij} < R$. Resulta que $R_{ij} > R$ para todos los jets finales i y j .

2.4. FASTJET

Fastjet⁶ es un programa en lenguaje C++, implementa algoritmos de reconstrucción de jets y una vez hallados, cuenta con la posibilidad de calcular el momento, su energía, su pseudorapidez, entre otras variables físicas que posee.

Ahora con los elementos mencionados se construye el canal utilizando Pythia para generar el choque de protones a una energía de centro de masa de 7 TeV, con los decaimientos requeridos de acuerdo a las condiciones fijadas. Luego los datos obtenidos son empleados para obtener los jets con Fastjet, fijando el parámetro $R = 0,7$ y seleccionando el algoritmo k_T , el desarrollo se indica en el apéndice.

⁶<http://www.lpthe.jussieu.fr/~salam/fastjet>

3 RESULTADOS

En el LHC cuando un protón choca contra otro, no se tiene certeza que todos sus componentes interaccionan,¹ en consecuencia, la energía centro de masa(E_{CM}) del protón es distinta al de sus constituyentes, en este trabajo la producción de partículas viene del subproceso $qg \rightarrow squark gluino$, como se ve en la figura 3.1a la E_{CM} es aproximadamente igual a 2.51 TeV.

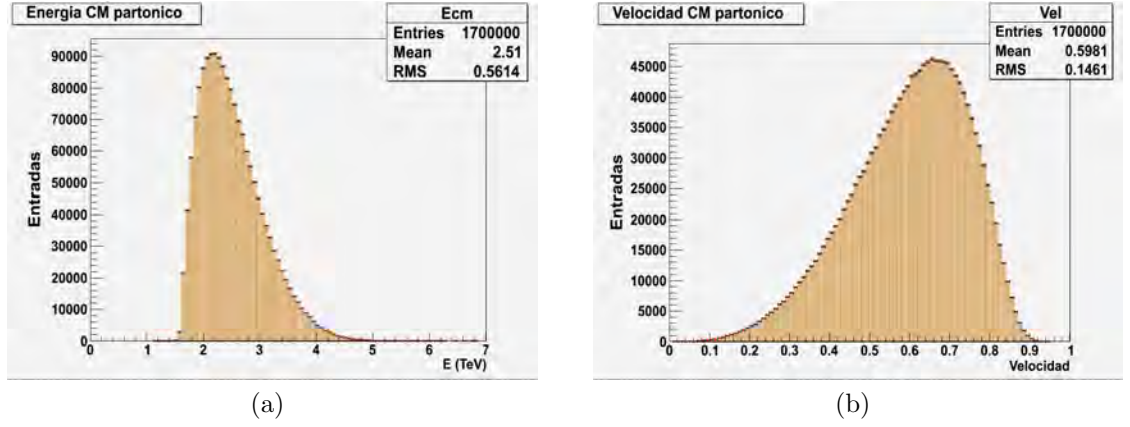


Figura 3.1: (a)Energía centro de masa partónico y (b) Velocidad centro de masa partónico

3.1. ENERGÍA TRANSVERSAL FALTANTE

Para determinar la energía transversal faltante utilizamos la definición dada en el capítulo 1, los resultados son mostrados en las figuras 3.2 y 3.3 . En la primera el valor medio es de 286.3 GeV y en la segunda 217.7 GeV.

¹Huertas Guativa, Lina. Producción de s-quarks y gluinos en el experimento CMS, 2009, pag. 32

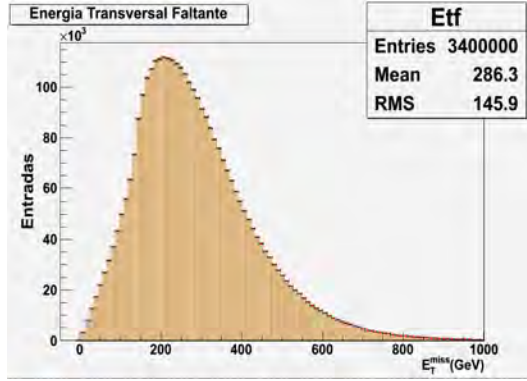


Figura 3.2: E_T parte superior canal

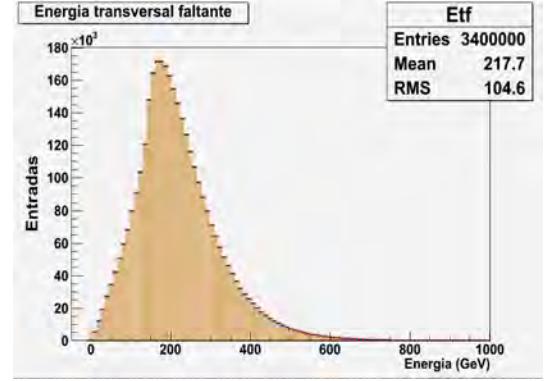


Figura 3.3: E_T parte inferior del canal

Ahora se muestra la separación angular entre las partículas generadas de la parte superior del canal, a partir de la formula:

$$\cos \theta_{12} = \frac{\vec{P}_1 \cdot \vec{P}_2}{P_1 P_2}$$

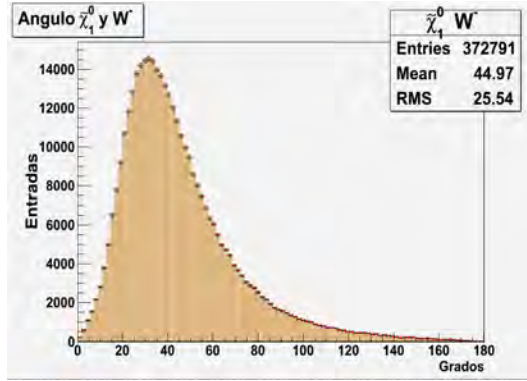


Figura 3.4: Separación angular entre $\tilde{\chi}_1^0$ y W^-

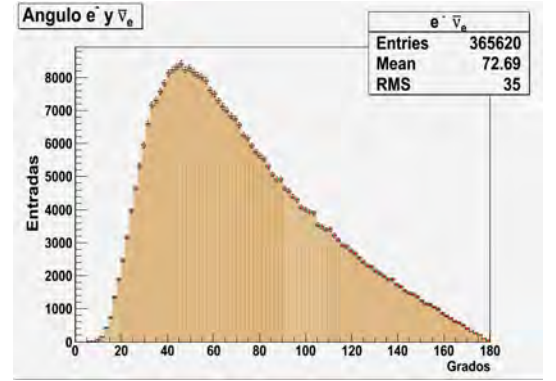


Figura 3.5: Separación angular entre e^- y $\bar{\nu}_e$

La distribución angular entre $\tilde{\chi}_1^0$ y W^- es mostrada en la figura 3.4, con un valor medio de 44.97 grados; mientras que en la figura 3.5 está la separación angular entre e^- y $\bar{\nu}_e$ con un ángulo promedio de 72.69 grados. Estas distribuciones son las que deberíamos de hallar en los datos del experimento para el canal como el que estamos simulando.

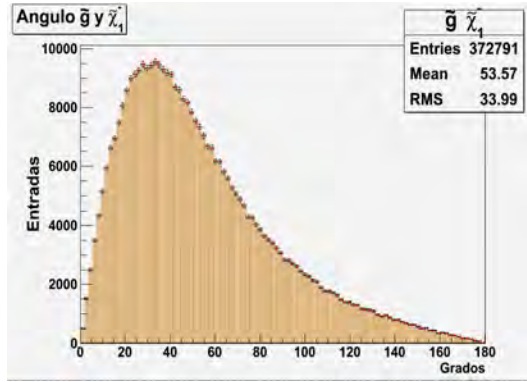


Figura 3.6: Separación angular entre \tilde{g} y $\tilde{\chi}_1^-$

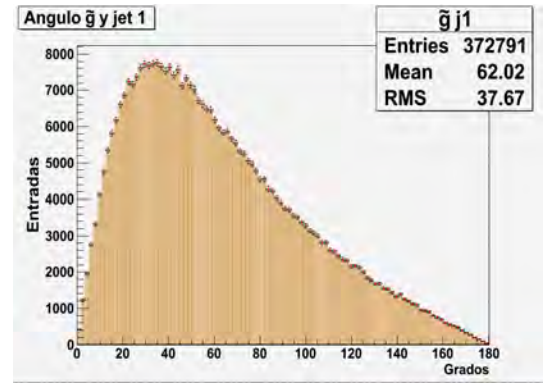


Figura 3.7: Separación angular entre \tilde{g} y jet 1

La figura 3.6 presenta los angulos originados entre \tilde{g} y $\tilde{\chi}_1^-$ de todos los eventos producidos, en promedio se ubica en 53.57 grados. Mientras en la figura 3.7 indica una separación angular media de 62.02 grados entre \tilde{g} y jet 1.

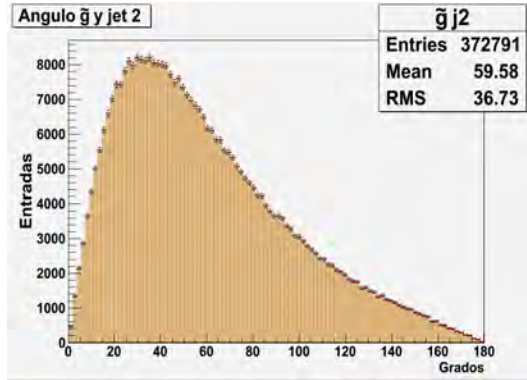


Figura 3.8: Separación angular entre \tilde{g} y jet 2

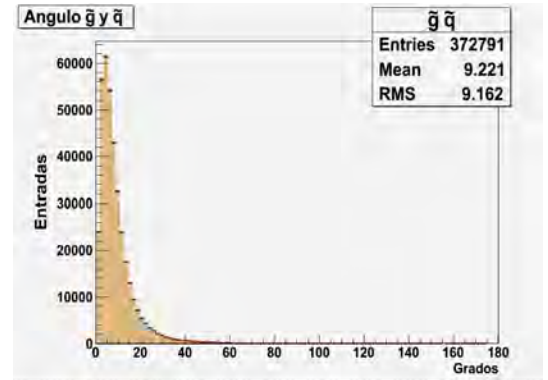


Figura 3.9: Separación angular entre \tilde{g} y \tilde{q}

Un valor medio de 59.58 grados indica la distribución angular entre \tilde{g} y jet 2 en la figura 3.8. El promedio de la grafica 3.9 obtenido entre \tilde{g} y \tilde{q} esta en 9.2 grados.

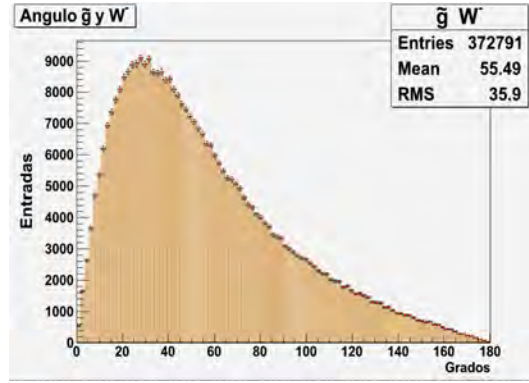


Figura 3.10: Separación angular entre \tilde{g} y W^-

La figura 3.10 indica la separación angular entre \tilde{g} y W^- , con un valor medio de 55.49 grados.

Las siguientes graficas corresponden a la parte inferior del canal.

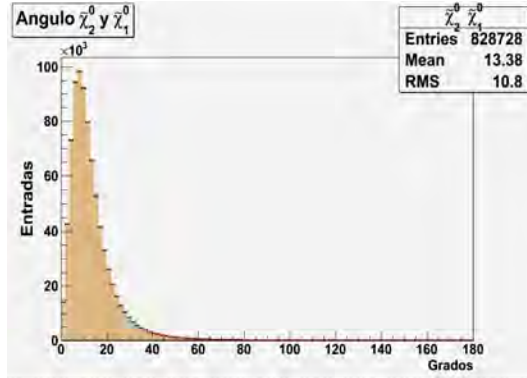


Figura 3.11: Separación angular entre $\tilde{\chi}_2^0$ y $\tilde{\chi}_1^0$

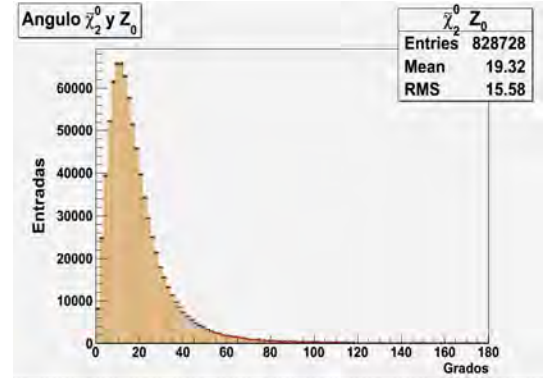


Figura 3.12: Separación angular entre $\tilde{\chi}_2^0$ y Z_0

La separación angular de $\tilde{\chi}_2^0$ y $\tilde{\chi}_1^0$ es de 13.38 grados y en promedio hay un ángulo de separación de 19.32 grados entre $\tilde{\chi}_2^0$ y Z_0 , indicados en las figuras 3.11 y 3.12 respectivamente.

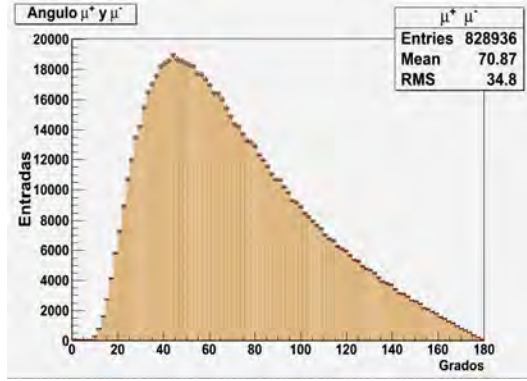


Figura 3.13: Separación angular entre μ^+ y μ^-

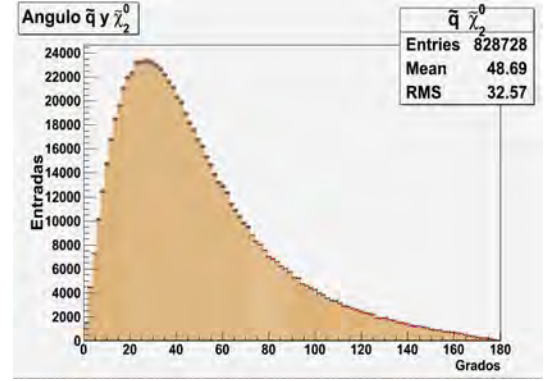


Figura 3.14: Separación angular entre \tilde{q} y $\tilde{\chi}_2^0$

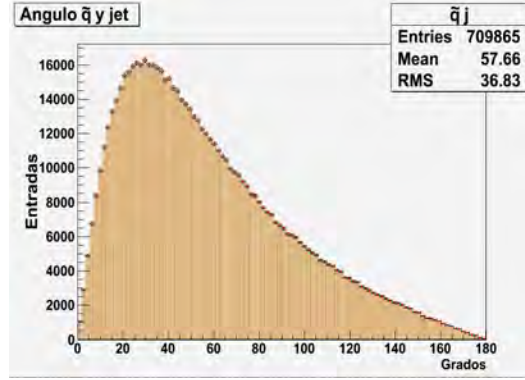


Figura 3.15: Separación angular entre \tilde{q} y jet

Las figuras 3.13, 3.14 y 3.15, indican las separaciones angulares de μ^+ y μ^- con valor de 70.87 grados, a la de \tilde{q} y $\tilde{\chi}_2^0$ con 48.69 grados y la que hay entre \tilde{q} y jet de 57.66 grados.

3.2. RECONSTRUCCIÓN DE JETS

De acuerdo a las características de los jets² vista en el capítulo 1, se buscó jets con un $P_t \geq 20$ GeV, con $R = 0.7$ y el algoritmo k_t , esto se define en el programa Fastjet, generó las graficas de P_t , ϕ y η . Los resultados para la primera producción de jets de la parte superior son señalados en la figura 3.18.

²Ellis S. D.,Huston J., Hatakeyama K., Loch P., Tonnesmann M.,Jets in Hadron-Hadron Collisions, arXiv:0712.2447v1 [hep-ph],pag. 1-6,51,53,56

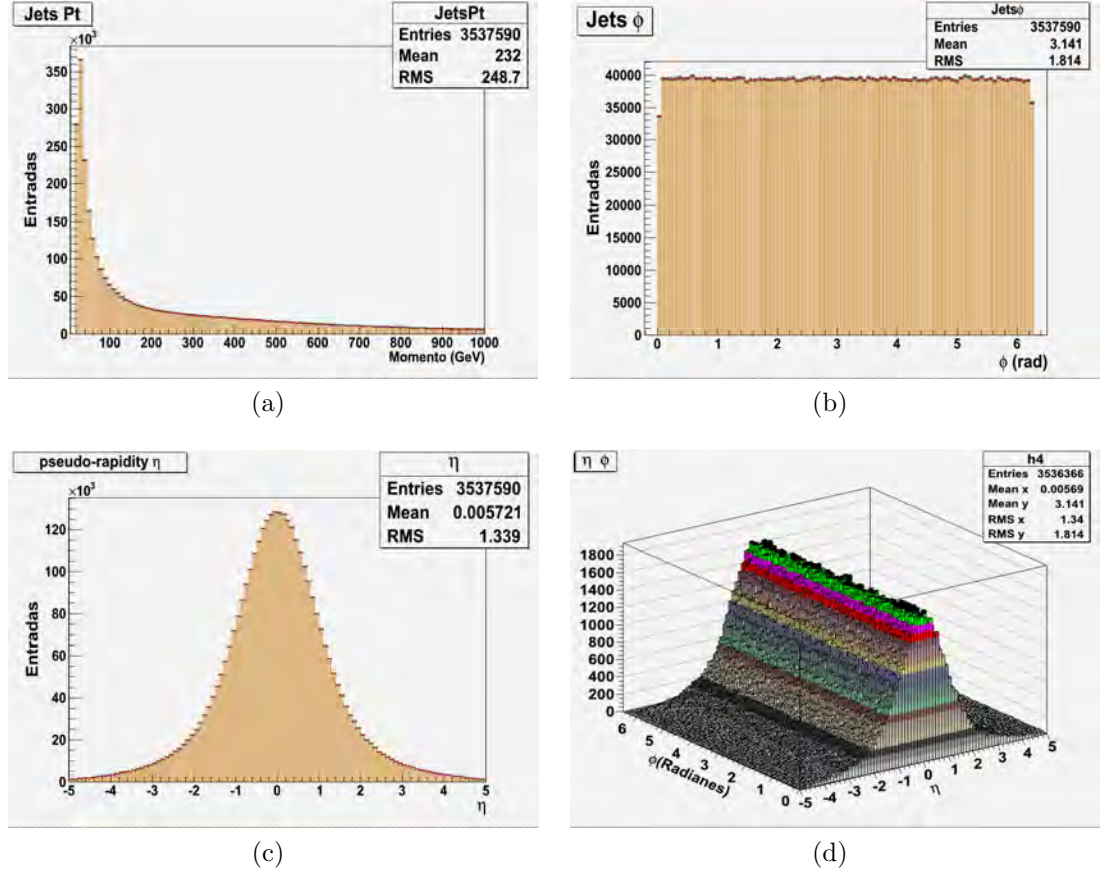
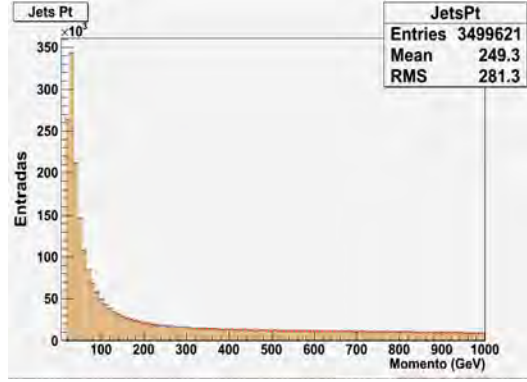


Figura 3.16: Gráficas de (a) momento transversal, (b) ángulo ϕ , (c) pseudorapidez η y $\eta\phi$ del primer jet

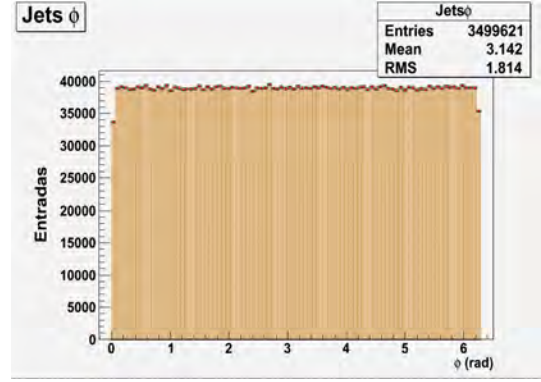
De acuerdo a lo anterior el momento transversal es aproximadamente de 232 GeV, el ángulo $\phi=3.141$ radianes y $\eta = 0.005721$. Teniendo en cuenta la definición de pseudo-rapidez:

$$\eta = -\ln(\tan \frac{\theta}{2}) \text{ por lo que } \theta = 2\text{Arctan}(e^{-\eta})$$

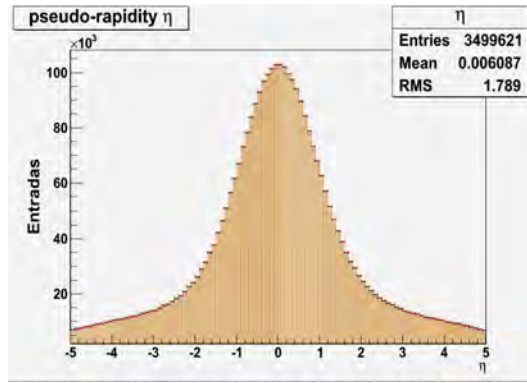
Procedemos a reemplazar el valor obtenido de η , entonces θ toma el valor de 89.67 grados.



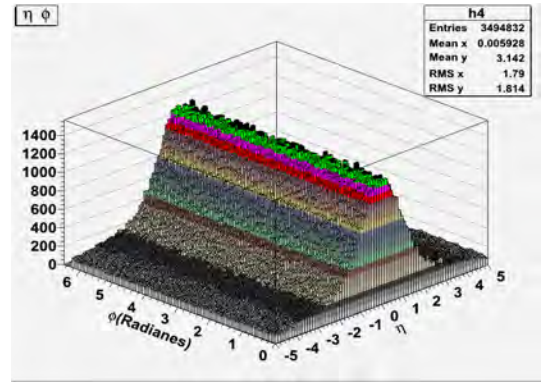
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.17: Gráficas de (a) momento transversal, (b) ángulo ϕ , (c) pseudorapidez η y $\eta - \phi$ del segundo jet

La figura 3.17 son los resultados generados para la segunda creación de jets en la parte superior del canal de estudio, en este caso el momento transversal es de 249.3 GeV, el ángulo $\phi=3.142$ radianes y $\eta = 0.006087$, de éste último valor resulta $\theta = 89.65$ grados

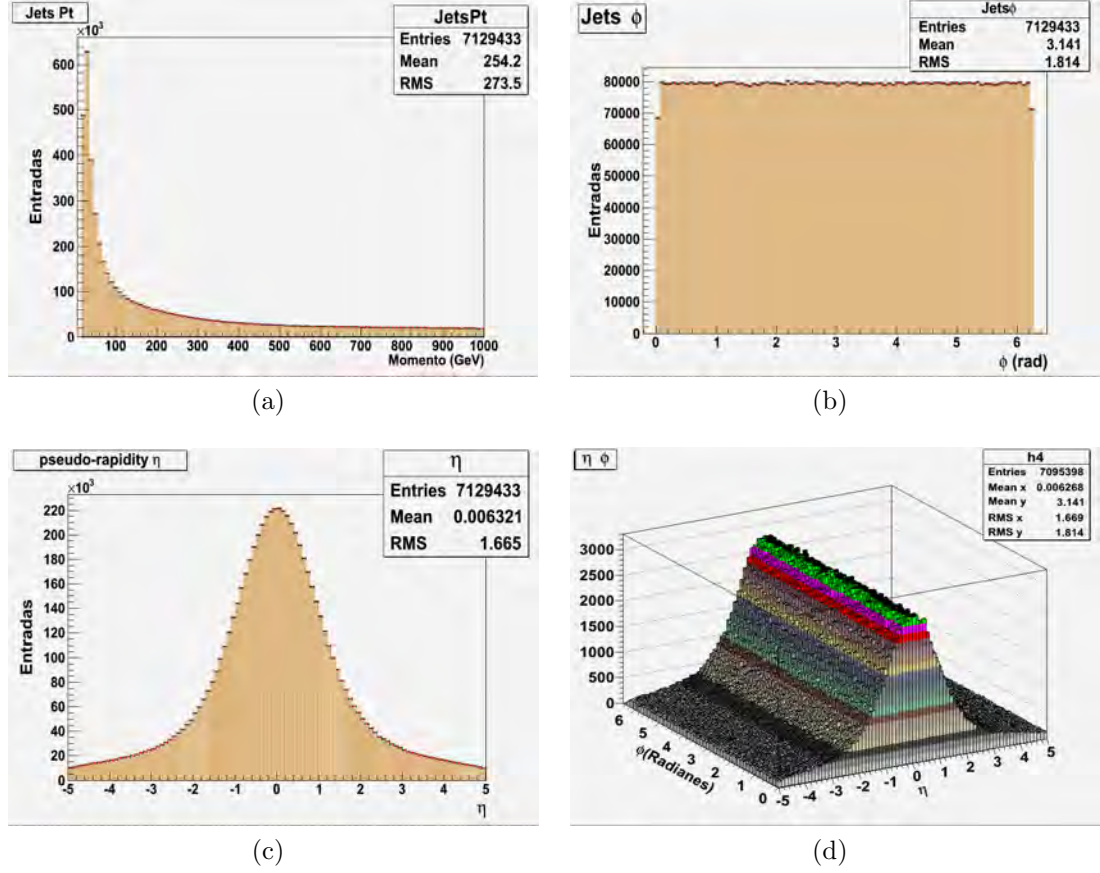


Figura 3.18: Gráficas de (a) momento transversal, (b) ángulo ϕ y (c) psedorapidez η jet parte inferior

Para los jets de la parte inferior los resultados, indicados en la figura 3.18, son los siguientes: momento transversal $p_T = 254.2$ GeV, $\phi = 3.141$ radianes, $\eta = 0.006321$ y $\theta = 89.64$ grados.

3.3. MASA INVARIANTE

Hallamos la masa invariante para el par de muones, que se calcula de la siguiente manera:

$$M_{\mu\mu} = \sqrt{(E_{\mu^+} + E_{\mu^-})^2 - (p_{\mu^+} + p_{\mu^-})^2}$$

con el fin de determinar si provenian del boson Z_0 , a la grafica de los datos se le hizo un ajuste de curva con el uso de root.

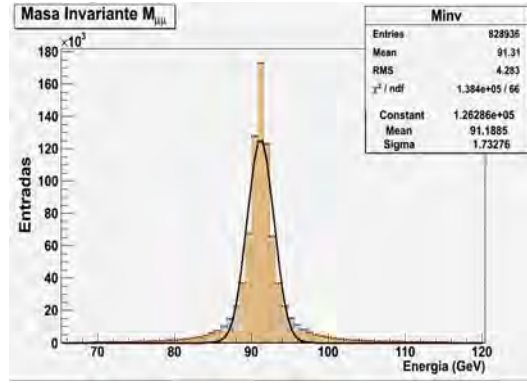


Figura 3.19: Masa invariante de muones

De esta gráfica podemos ver que la masa invariante es de 91.1885 ± 5.1984 GeV, de acuerdo al Particle Data Group(PDG)³ la masa del Z_0 tiene un valor ⁴ estimado de $m_{Z_0} = 91,1876 \pm 0,0021$ GeV.

De igual manera se determina la masa invariante para los leptones e^- y $\bar{\nu}_e$. La gráfica es la siguiente

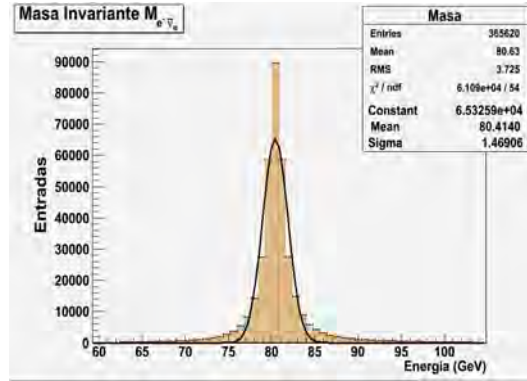


Figura 3.20: Masa invariante e^- y $\bar{\nu}_e$

En esta se observa un valor de la masa de 80.4140 ± 4.4073 GeV y en el PDG $m_W = 80,385 \pm 0,015$ GeV, revelando que su producción viene del decaimiento del bosón W .

³<http://pdg.lbl.gov>

⁴J. Beringer et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D86, 010001 (2012)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La energía transversal faltante para la parte superior del canal tiene una media de 286.3 GeV y la parte inferior de 217.7 GeV aproximadamente. Esta cantidad de energía está relacionada con la presencia de neutralinos.
- La masa invariante del par de muones que tiene un valor 91.1885 ± 5.1984 GeV, corresponde a la masa del bosón Z^0 y para el electrón y antineutrino electrónico a 80.4140 ± 4.4073 GeV que corresponde al bosón W^- .
- La separación angular para los estados finales del canal de estudio de los muones es aproximadamente de 70.87 grados y para los leptones de 72.69 grados.
- De acuerdo a los resultados que hemos obtenido en el canal que corresponde a los parámetros cinemáticos de tipo experimental, dentro de los cuales tenemos los siguientes: separación angular, E_T^{miss} , masa invariante de los estados finales, distribución de p_t , ϕ y η . En el experimento CMS en el eventual caso de que llegue a producirse este canal de decaimiento, son estos resultados los que deberían de dar una guía.

Realizar el programa sin estados iniciales y finales de radiación, para compararlo con los obtenidos y observar si hay cambios significativos en los resultados. Además buscar un mejor script para hacer el análisis de las partículas del canal de estudio

BIBLIOGRAFÍA

Baden, Andrew R. Jets and Kinematics in Hadronic Collisions, International Journal of Modern Physics A, World Scientific Publishing Company, Revised December 24, 1997.

CERN faq LHC the guide, Communication Group, February 2009 CERN-Brochure-2009-003-Eng.

CMS Physics, Volume I: Detector Performance and Software, CERN/LHCC 2006-001, CMS TDR 8.1.

Drees, Manuel. An Introduction to Supersymmetry, arXiv:hep-ph/9611409v1.

Ellis S. D., Huston J., Hatakeyama K., Loch P., Tonnesmann M., Jets in Hadron-Hadron Collisions, arXiv:0712.2447v1 [hep-ph].

Enberg, Rikard. Quantum Chromodynamics and Colour Singlet Exchange in High Energy Interactions, Printed in Sweden by Eklundshofs Grafiska AB, Uppsala 2003

Gómez Camacho, Joaquín. Partículas Elementales, junio 6, 2001.

Griffiths, David. Introduction to Elementary Particles. Jhon Wiley & Sons, INC. 1987.

Grupen, Claus. Shwartz, Boris. Particle Detector second edition, Cambridge University Press 2008

Hubisz, Jay. Lykken, Joseph. Pierini, Maurizio. Spiropulu, Maria. Missing energy look alike with 100 pb^{-1} at the LHC, arXiv:0805.2398v2 [hep-ph] 30 Jul 2008.

Huertas Guativa, Lina. Producción de s-quarks y gluinos en el experimento CMS, 2009.

Martin, B.R. Shaw, G. Particle Physics, third edition, John Wiley & Sons Ltd, 2008.

Martin, Stephen P. A Supersymmetry Primer, arXiv:hep-ph/9709356v5.

Nagashima, Yorikiyo, Elementary Particle Physics Vol. 1, WILEY-VCH Verlag GmbH Co. KGaA. 2010.

Perkins, Donald H. Introduction to High Energy Physics Four Edition, Cambridge University Press 2000.

<http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/>. Citado en septiembre 15 de 2013

<http://cms.web.cern.ch/news/what-cms>, citado en septiembre 15 de 2013.

<http://cms.web.cern.ch/news/tracker-detector>. Citado en septiembre 16 de 2013.

<http://cms.web.cern.ch/news/silicon-pixels>. Citado en septiembre 16 de 2013

<http://cms.web.cern.ch/news/silicon-strips>. Citado en septiembre 16 de 2013.

<http://home.thep.lu.se/torbjorn/Pythia.html>. Citado en agosto 15 de 2012

<http://www.lpthe.jussieu.fr/salam/fastjet>. Citado en agosto 15 de 2012

<http://root.cern.ch/drupal/content/users-guide>. Citado en agosto 15 de 2012

<http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/ALICE-en.html>. Citado en septiembre 17 de 2013

<http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/ATLAS-en.html>. Citado en septiembre 17 de 2013.

<http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/LHCb-en.html>. Citado en septiembre 17 de 2013

<http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/LHCf-en.html>. Citado en septiembre 18 de 2013

<http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/TOTEM-en.html>. Citado en septiembre 15 de 2013.

ANEXO A.

3.4. PROGRAMAS UTILIZADOS EN LA SIMULACIÓN

3.4.1. PYTHIA 8 ⁵

no	id	name	status	mothers	daughters	colours	p_x	p_y	p_z	e	m
0	90	(system)	-11	0	0	0	0	0.000	0.000	0.000	7000.000
1	2212	(p+)	-12	0	0	7	0	0.000	0.000	3500.000	3500.000
2	2212	(p+)	-12	0	0	8	0	0.000	0.000	-3500.000	3500.000
3	21	(g)	-21	7	7	5	6	102	103	0.000	409.182
4	2	(u)	-21	8	8	5	6	101	0	0.000	-1657.689
5	1000002	(~u_L)	-22	3	4	9	9	102	0	162.369	98.543
6	1000021	(~g)	-22	3	4	10	10	101	103	-162.369	-98.543

Figura 3.21: Generación de evento en pythia 8

En el caso de este simulador de eventos existen las clases:

- *ParticleData*: Es una clase en donde se consignan todos los datos de las partículas, así como su identidad encontrada en Particle Data Group.
- *ParticleDataEntry*: Almacena la información de una partícula en especial.
- *DecayChannel*: Almacena la información de un decaimiento específico de una partícula.

Para modificar los decaimientos posibles de una partícula se utiliza *ReadString* de la siguiente manera:

```
pythia8->ReadString("-1000024:onMode = off")
pythia8->ReadString("-1000024:onIfMatch = 1000022 11");
```

El comando *onMode=off* se usa para apagar el canal, mientras que *onIfMatch* lo hace funcionar si genera los productos deseados, otras opciones para hacer modificaciones son:

- 0 apaga el canal.

⁵<http://home.thep.lu.se/~torbjorn/Pythia.html>

- 1 enciende el canal.
- 2 prendido para una partícula y apagado para su antipartícula.
- 3 prendido para la antipartícula y apagado para la partícula.

Una parte de un evento realizado por Pythia8 se muestra a continuación

```
pythia8->Initialize(2212 /* p */, 2212 /* p */, 7000. /* TeV */);
```

En esta parte del programa se le dice al programa que tipo de partículas colisionan, el ejemplo corresponde al protón(código 2212)y la energía que lleva cada una.

3.4.2. FASTJET Este programa es diseñado en lenguaje C++⁶, el cual hace uso de los algoritmos de reconstrucción de jets vistos en el capítulo 3.

Para la implementación y el uso de este programa, se requiere conocer los siguientes aspectos, contiene tres tipos de clases principales

- *fastjet::PseudoJet*: Provee a un jet del cuadrimomento.
- *fastjet::ClusterSequence*: Acceso al estado final de los jets.
- *fastjet::JetDefinition*: Especifica el desempeño de como ordenar un jet.

El uso que se le da a cada una de las clases esta impreso en los codigos utilizados para la busqueda de jets.

⁶<http://www.lpthe.jussieu.fr/~salam/fastjet>

ANEXO B.

3.5. CODIGOS UTILIZADOS PARA GENERAR EL CANAL DE ESTUDIO

Para la parte superior del canal

```
void canal(Int_t nev = 1700000) { //Número de eventos generados

char* path = gSystem->ExpandPathName("$PYTHIA8DATA");
if (gSystem->AccessPathName(path)) {
Warning("pythia8.C",
"Environment variable PYTHIA8DATA must contain path to pythi8100/xmldoc directory !");
return;
}

// Cargar librerías ejecutar la simulación
gSystem->Load("$PYTHIA8/lib/libpythia8");
gSystem->Load("$PYTHIA8/lib/liblhpdfdummy");

gSystem->Load("libEG");
gSystem->Load("libEGPythia8");

//Definir archivo de salida
TFile * outfile = new TFile("arriba.root","RECREATE");

// Array of particles
TClonesArray* particles = new TClonesArray("TParticle", 8000);

//Definir el TTree
TTree *tree= new TTree("tree","Arbol con particulas");
tree->Branch("particles",&particles);

// Create pythia8 object
TPythia8* pythia8 = new TPythia8();

// Configure

pythia8->ReadString("SUSY:qg2squarkgluino = on"); // Producción de squark-gluino
pythia8->ReadString("SLHA:file = SUSY_LM2_sftsht.slha");//Lectura de parámetros msugra.

// Iniciar el proceso y selección de decaimientos de las partículas
pythia8->Initialize(2212 /* p */, 2212 /* p */, 7000. /* TeV */);
pythia8->ReadString("1000021:onMode = off");
pythia8->ReadString("1000021:onIfAny = 1000001 1000003 1000005 2000005"); // ~g -> sq
pythia8->ReadString("1000005:onMode = off");
pythia8->ReadString("1000005:onIfMatch =6 -1000024 6"); // ~b_1 -> ~chi_1- t
pythia8->ReadString("2000005:onMode = off");
pythia8->ReadString("2000005:onIfMatch = -1000024 6"); // ~b_2 -> ~chi_1- t
pythia8->ReadString("1000001:onMode = off");
pythia8->ReadString("1000001:onIfMatch = -1000024 2"); // ~d_L -> ~chi_1- u
pythia8->ReadString("1000003:onMode = off");
pythia8->ReadString("1000003:onIfMatch = -1000024 4"); // ~s_L -> ~chi_1- c
pythia8->ReadString("1000024:onMode = off");
pythia8->ReadString("1000024:onIfMatch = 1000022 24");//~chi_1- -> ~chi_10 W
pythia8->ReadString("24:onMode = off");
pythia8->ReadString("24:onIfMatch = -11 12");//W -> e+ nu_e
```



```

//HISTOGRAMAS

TH1F *h1 = new TH1F("Etf", "Energia Transversal Faltante", 100, -50, 1000);
h1->GetXaxis()->SetTitle("E_{T}^{miss}(GeV)");
h1->GetYaxis()->SetTitle("Entradas");

TH1F *h2 = new TH1F("Masa", "Masa Invariante M_{e^{-}}\bar{\nu}_{e}", 100, 40, 120);
h2->GetXaxis()->SetTitle("Energia GeV");
h2->GetYaxis()->SetTitle("Entradas");

TH1F *h3 = new TH1F("#tilde{g} #tilde{q}", "Angulo #tilde{g} y #tilde{q} ", 100, 0, 180);
h3->GetXaxis()->SetTitle("Grados");
h3->GetYaxis()->SetTitle("Entradas");

TH1F *h4 = new TH1F("#tilde{g} j1", "Angulo #tilde{g} y jet 1 ", 100, 0, 180);
h4->GetXaxis()->SetTitle("Grados");
h4->GetYaxis()->SetTitle("Entradas");

TH1F *h5 = new TH1F("#tilde{g} j2", "Angulo #tilde{g} y jet 2 ", 100, 0, 180);
h5->GetXaxis()->SetTitle("Grados");
h5->GetYaxis()->SetTitle("Entradas");

TH1F *h6 = new TH1F("#tilde{g} #tilde{\chi}_{1}^{-}",
    "Angulo #tilde{g} y #tilde{\chi}_{1}^{-}", 100, 0, 180);
h6->GetXaxis()->SetTitle("Grados");
h6->GetYaxis()->SetTitle("Entradas");

TH1F *h7 = new TH1F("#tilde{g} W^{-}", "Angulo #tilde{g} y W^{-}", 100, 0, 180);
h7->GetXaxis()->SetTitle("Grados");
h7->GetYaxis()->SetTitle("Entradas");

TH1F *h8 = new TH1F("#tilde{\chi}_{1}^{0} W^{-}",
    "Angulo #tilde{\chi}_{1}^{0} y W^{-}", 100, 0, 180);
h8->GetXaxis()->SetTitle("Grados");
h8->GetYaxis()->SetTitle("Entradas");

TH1F *h9 = new TH1F("e^{+} #bar{\nu}_{e}", "Angulo e^{+} y #bar{\nu}_{e} ", 100, 0, 180);
h9->GetXaxis()->SetTitle("Grados");
h9->GetYaxis()->SetTitle("Entradas");

TH1F *h10 = new TH1F("Ecm", "Energia CM partonico ", 100, 0, 7);
h10->GetXaxis()->SetTitle("Energia (TeV)");
h10->GetYaxis()->SetTitle("Entradas");

TH1F *h11 = new TH1F("Vel", "Velocidad CM partonico ", 100, 0, 1);
h11->GetYaxis()->SetTitle("Entradas");

int iev = 0;

// Event loop
while( iev < nev ) {

    pythia8->GenerateEvent();//Generación del evento

    if (ievs < 1) pythia8->EventListing();//Vista en pantalla del evento

    pythia8->ImportParticles(particles,"All");

    Int_t np = particles->GetEntriesFast();

    // Particle loop

    Double_t pi = 4*atan(1);
    std::cout<<" Evento N "<<ievs+1<<endl;

```

```

for (Int_t ip = 0; ip < np; ip++) {

//Leemos informacion de cada particula

TParticle *part = (TParticle*) particles->At(ip); //Esta es la particula i
Int_t ist = part->GetStatusCode(); //obtenemos su estatus
Int_t pdg = part->GetPdgCode(); // y su codigo PDG

// Obtenemos aqui el momento y la energía de todas las particulas del canal

if (pdg==1||pdg==3||pdg==5)
{
Double_t e0 = part->Energy(); //Energía de la particula en GeV
Double_t px0 = part->Px(); //Componente del eje X del momento de la particula en GeV
Double_t py0 = part->Py(); //Componente del eje Y del momento de la particula en GeV
Double_t pz0 = part->Pz(); //Componente del eje Z del momento de la particula en GeV
Double_t p0 = part->P(); //Momento total de la particula en GeV
}

if (pdg==2||pdg==4||pdg==6)
{
Double_t e01 = part->Energy();
Double_t px01 = part->Px();
Double_t py01 = part->Py();
Double_t pz01 = part->Pz();
Double_t p01 = part->P();
}

if (pdg==1000021)
{
Int_t m1 = part->GetFirstMother(); //Número de la primera particula de la que proviene
Int_t d1 = part->GetFirstDaughter(); //Número del primer producto generado por la particula
Double_t e1 = part->Energy();
Double_t px1 = part->Px();
Double_t py1 = part->Py();
Double_t pz1 = part->Pz();
Double_t p1 = part->P();
}

if (abs(pdg)==1000001||abs(pdg)==1000002||abs(pdg)==1000003||abs(pdg)==1000004
||abs(pdg)==1000005||abs(pdg)==1000006||abs(pdg)==2000001||abs(pdg)==2000002
||abs(pdg)==2000003||abs(pdg)==2000004||abs(pdg)==2000005||abs(pdg)==2000006)
{
Int_t m2 = part->GetFirstMother();
Int_t d2 = part->GetFirstDaughter();
Double_t e2 = part->Energy();
Double_t px2 = part->Px();
Double_t py2 = part->Py();
Double_t pz2 = part->Pz();
Double_t p2 = part->P();
}

if (pdg==1000024)
{
Int_t d3 = part->GetLastDaughter(); //Número del segundo producto generado por la particula
Double_t e3 = part->Energy();
Double_t px3 = part->Px();
Double_t py3 = part->Py();
Double_t pz3 = part->Pz();
Double_t p3 = part->P();
}

if (pdg==1000022)
{

```

```

Int_t    m4    = part->GetFirstMother();
Int_t    d4    = part->GetFirstDaughter();
Int_t    d42   = part->GetLastDaughter();
Double_t e4    = part->Energy();
Double_t px4   = part->Px();
Double_t py4   = part->Py();
Double_t pz4   = part->Pz();
Double_t p4    = part->P();

if(d4==1&&d42==1)//Condición para elegir partículas estables
{
Double_t theta = acos(pz4/p4);//Ángulo polar
Double_t phi   = atan(py4/px4);//Ángulo azimutal
Double_t etfx  = e4*sin(theta)*cos(phi);//Componente X de la energía transversal faltante
Double_t etfy  = e4*sin(theta)*sin(phi);//Componente Y de la energía transversal faltante
Double_t Etf   = sqrt(etfx*etfx+etfy*etfy);//Obtención energía transversal faltante
h1->Fill(Etf);//Llenar el histograma con los datos de Etf
}
}

if (pdg==24)
{
Int_t    m5    = part->GetFirstMother();
Double_t e5    = part->Energy();
Double_t px5   = part->Px();
Double_t py5   = part->Py();
Double_t pz5   = part->Pz();
Double_t p5    = part->P();
}

if (pdg==11)
{
Int_t    m6    = part->GetFirstMother();
Double_t e6    = part->Energy();
Double_t px6   = part->Px();
Double_t py6   = part->Py();
Double_t pz6   = part->Pz();
Double_t p6    = part->P();
}

if (pdg==12)
{
Int_t    m7    = part->GetFirstMother();
Double_t e7    = part->Energy();
Double_t px7   = part->Px();
Double_t py7   = part->Py();
Double_t pz7   = part->Pz();
Double_t p7    = part->P();
}

//ENERGIA TRANSVERSAL FALTANTE

if (pdg==1000022||pdg==24)
{if (d1<d2 && d3 > d2) //Condición para elegir las partículas de los estados finales del canal
{if (m4 == m5 )
{
Double_t ang12 = acos((px1*px2+py1*py2+pz1*pz2)/(p1*p2))*180/pi;
Double_t ang13 = acos((px1*px3+py1*py3+pz1*pz3)/(p1*p3))*180/pi;
Double_t ang15 = acos((px1*px5+py1*py5+pz1*pz5)/(p1*p5))*180/pi;
Double_t ang45 = acos((px4*px5+py4*py5+pz4*pz5)/(p4*p5))*180/pi;
Double_t ang01 = acos((px0*px1+py0*py1+pz0*pz1)/(p0*p1))*180/pi;
Double_t ang011 = acos((px01*px1+py01*py1+pz01*pz1)/(p01*p1))*180/pi;
h3->Fill(ang12);
h4->Fill(ang01);
h5->Fill(ang011);
}
}
}

```

```

h6->Fill(ang13);
h7->Fill(ang15);
h8->Fill(ang45);
}
}
}

//MASA INVARIANTE

if (pdg==11||pdg==12)
{if (d1<d2 && d3 > d2)
{if (m4 == m5)
{if (d3 == m6 && m6 == m7)
{
Double_t suma = sqrt((e6+e7)*(e6+e7)-(px6+px7)*(px6+px7)-(py6+py7)*(py6+py7)-(pz6+pz7)*(pz6 +pz7));
Double_t ang67 = acos((px6*px7+py6*py7+pz6*pz7)/(p6*p7))*180/pi;
h2->Fill(suma);
h9->Fill(ang67);
}
}
}
}

if(pdg==1000021||abs(pdg)==1000001||abs(pdg)==1000002||abs(pdg)==1000003
||abs(pdg)==1000004||abs(pdg)==1000005||abs(pdg)==1000006||abs(pdg)==2000001
||abs(pdg)==2000002||abs(pdg)==2000003||abs(pdg)==2000004||abs(pdg)==2000005||abs(pdg)==2000006))

{if(m1==m2)
{
Double_t Ecm=sqrt(((e1+e2)*(e1+e2))+((p1+p2)*(p1+p2)))*0.001;//Energía de centro de masa partónico
Double_t Vcm=((p1+p2)/(e1+e2));//Velocidad de centro de masa partónico

h10->Fill(Ecm);
h11->Fill(Vcm);

}

}

}
tree->Fill();
++iev;

}

//Creación de lienzo para dibujar los histogramas creados

TCanvas *c1 = new TCanvas("c1","Parte superior canal ", 100, 100, 600, 500);
h1->Draw();

TCanvas *c2 = new TCanvas("c2","parte superior canal ", 100, 100, 600, 500);
h2->Draw();

TCanvas *c3 = new TCanvas("c3","parte superior canal ", 100, 100, 600, 500);
h3->Draw();

TCanvas *c4 = new TCanvas("c4","parte superior canal ", 100, 100, 600, 500);
h4->Draw();

TCanvas *c5 = new TCanvas("c5","Parte superior canal ", 100, 100, 600, 500);

```

```

h5->Draw();

TCanvas *c6 = new TCanvas("c6","parte superior canal ", 100, 100, 600, 500);
h6->Draw();

TCanvas *c7 = new TCanvas("c7","parte superior canal ", 100, 100, 600, 500);
h7->Draw();

TCanvas *c8 = new TCanvas("c8","parte superior canal ", 100, 100, 600, 500);
h8->Draw();

TCanvas *c9 = new TCanvas("c9","parte superior canal ", 100, 100, 600, 500);
h9->Draw();

TCanvas *c10 = new TCanvas("c10","parte superior canal ", 100, 100, 600, 500);
h10->Draw();

TCanvas *c11 = new TCanvas("c11","parte superior canal ", 100, 100, 600, 500);
h11->Draw();

pythia8->PrintStatistics();//Imprime mensajes de error y advertencias

outfile->Write();

}

```

Para la generación de jets se utilizó el siguiente código

```

// $Id: $
// Include files

// local
#include "JetPythiaAnalysis.h"

//-----
// Implementation file for class : JetPythiaAnalysis
//
// 2011-03-31 : Andres Osorio
//-----

//=====
// Standard constructor, initializes variables
//=====
JetPythiaAnalysis::JetPythiaAnalysis( const char * fname ) : PythiaAnalysis(fname) {

}
//=====
// Destructor
//=====
JetPythiaAnalysis::~~JetPythiaAnalysis() {}

//=====

void JetPythiaAnalysis::Loop()
{

if (fChain == 0) return;

Long64_t nentries = fChain->GetEntriesFast();
Long64_t nbytes = 0, nb = 0;

```

```

//Aqui se crea el contenedor para almacenar los Z0
TList *v_Muons = new TList();

std::cout << "nevt: " << nentries << std::endl;

// Creación de histogramas

TH1F * h_JetPt = new TH1F("JetsPt","Jets Pt",100, 5, 1000);
h_JetPt->GetXaxis()->SetTitle("Momento (GeV)");
h_JetPt->GetYaxis()->SetTitle("Entradas");

TH1F * h_JetPhi = new TH1F("Jets#phi","Jets #phi",100, -0.5, 6.5);
h_JetPhi->GetXaxis()->SetTitle("#phi (rad)");
h_JetPhi->GetYaxis()->SetTitle("Entradas");

TH1F * h_JetRapidity = new TH1F("#eta","pseudo-rapidity #eta",100, -5, 5);
h_JetRapidity->GetXaxis()->SetTitle("#eta");
h_JetRapidity->GetYaxis()->SetTitle("Entradas");

// Elegir el valor de R y el tipo de algoritmo para encontrar jets
double R = 0.7;
fastjet::JetDefinition jet_def(fastjet::kt_algorithm, R);

for (Long64_t jentry=0; jentry<nentries;jentry++) {

Long64_t ientry = LoadTree(jentry);
if (ientry < 0) break;
nb = fChain->GetEntry(jentry);   nbytes += nb;

int np = 0;
int max_part = particles_;
std::vector<fastjet::PseudoJet> particles;

std::cout << "evt: " << jentry << std::endl;

//Implementar aqui el analisis
while ( np < max_part ) {

\\Definición de variables

int pdg = particles_fPdgCode[np];
int m0 = 0;int m01 = 0;int d1 = 0;int d12 = 0;int d2 = 0;int d22 = 0;int m2 = 0;
int m3 = 0;int m4 = 0;int d3 = 0;int d5 = 0;int m5 = 0;

if (pdg==1||pdg==3||pdg==5)
{
    m0 = particles_fMother[np][0];
}

if (pdg==1||pdg==2||pdg==3||pdg==4||pdg==5||pdg==6)
{
    m01 = particles_fMother[np][0];
}

if (pdg == 1000021)
{
    d1 = particles_fDaughter[np][0];
    d12 = particles_fDaughter[np][1];
}

if (pdg==1000001||pdg==1000002||pdg==1000003||pdg==1000004||pdg==1000005||pdg==1000006||
    pdg==2000001||pdg==2000002||pdg==2000003||pdg==2000004||pdg==2000005||pdg==2000006)

```

```

    {
        d2 = particles_fDaughter[np][0];
        d22 = particles_fDaughter[np][1];
        m2 = particles_fMother[np][0];
    }
    if(pdg==1000024)
    {
        d3 = particles_fDaughter[np][0];
        m3 = particles_fMother[np][0];
    }

    if(pdg==1000022)
    {
        m4 = particles_fMother[np][0];
    }

    if(pdg==1000023)
    {
        d5 = particles_fDaughter[np][0];
        m5 = particles_fMother[np][0];
    }

    //Condiciones para obtener primer jet canal parte superior
    /* if (pdg==1||pdg==3||pdg==5)
        {if (m2==d1)
            { if (m3==d2&& m4==d3)
                {
                    particles.push_back( fastjet::PseudoJet( particles_fPx[np],
                                                                particles_fPy[np],
                                                                particles_fPz[np],
                                                                particles_fE[np] ) );
                }
            }
        }*/

    //Condiciones para obtener segundo jet canal parte superior
    if(pdg==2||pdg==4||pdg==6)
    {if (m2==d1)
        {if (m3==d2&& m4==d3)
            {
                particles.push_back( fastjet::PseudoJet( particles_fPx[np],
                                                            particles_fPy[np],
                                                            particles_fPz[np],
                                                            particles_fE[np] ) );
            }
        }
    }

    //Condiciones para obtener jet canal parte inferior
    /* if (pdg==1||pdg==2||pdg==3||pdg==4||pdg==5||pdg==6)
        {
            { if (m5==d2&& m4==d5)
                {
                    particles.push_back( fastjet::PseudoJet( particles_fPx[np],
                                                                particles_fPy[np],
                                                                particles_fPz[np],
                                                                particles_fE[np] ) );
                }
            }
        }*/

```

```

    ++np;

}

if ( particles.size() <= 0 )
    continue;

    fastjet::ClusterSequence cs(particles, jet_def);
    double ptmin = 20.0;//Corte de momento transversal faltante
    std::vector<fastjet::PseudoJet> jets = cs.inclusive_jets(ptmin);

    // print the jets
    std::cout << "Ran " << jet_def.description() << endl;
    std::cout << " pt y phi" << std::endl;
    for (unsigned i = 0; i < jets.size(); i++) {
        std::cout << "jet " << i << ": " << jets[i].perp() << " "
            << jets[i].rap() << " " << jets[i].phi() << endl;
        h_JetPt->Fill( jets[i].perp() );
        h_JetPhi->Fill( jets[i].phi() );
        h_JetRapidity->Fill( jets[i].rapidity() );
    }

    std::cout << "-----";
    jets.clear();
    particles.clear();
    std::cout << " // -----" << std::endl;

} //cierra loop sobre eventos

TCanvas *c17 = new TCanvas("c17","Jets Pt", 100, 100, 600, 500);
c17->Divide(1,1);
h_JetPt->Draw();

TCanvas *c18 = new TCanvas("c18","Jets phi", 100, 100, 600, 500);
c18->Divide(1,1);
h_JetPhi->Draw();

TCanvas *c19 = new TCanvas("c19","Jets Pseudo-rapidity", 100, 100, 600, 500);
c19->Divide(1,1);
h_JetRapidity->Draw();

//termina Loop() limpiar memoria:
delete v_Muons;

}

```