

VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS M-SUGRA EN EL CANAL DE
DECAIMIENTO DE UN S-QUARK Y UN GLUINO VÍA NEUTRALINOS QUE
DECAEN EN UN PAR LEPTÓN-ANTILEPTON (e^-e^+ , $\mu^-\mu^+$)

WILLIAM ORLANDO ERASO GARZÓN

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

2014

VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS M-SUGRA EN EL CANAL DE
DECAIMIENTO DE UN S-QUARK Y UN GLUINO VÍA NEUTRALINOS QUE
DECAEN EN UN PAR LEPTÓN-ANTILEPTON (e^-e^+ , $\mu^-\mu^+$)

WILLIAM ORLANDO ERASO GARZÓN

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE FÍSICO

DIRECTOR:

JAIME BETANCOUR

MÁSTER EN CIENCIAS FÍSICAS

CODIRECTOR:

BERNADO GOMEZ

DOCTOR EN CIENCIAS FÍSICAS

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 Betancourth.
Asesor.

Phd. Bernardo Gómez
Coasesor.

Msc. Javier Contreras Grijalva
Jurado.

Phd. Alvaro Rugeles Perez
Jurado.

RESUMEN

En este trabajo se hace la simulación de un canal de decaimiento para la búsqueda de partículas supersimétricas y análisis de sus principales características cinemáticas para ver como estas cambian al hacer una variación de parámetros m-Sugra. Con el uso del software PYTHIA 6 se produce un Squark y un Gluino en la colisión protón-protón a energía centro de masa de 7 TeV y la posterior cadena de decaimiento con estado final de un par de leptones de signo opuesto ($e^-e^+, \mu^-\mu^+$). El análisis de variación de parámetros m-Sugra se hace en la reconstrucción de masa del par de leptones en estado final que provienen del decaimiento de un bosón Z, el ángulo de separación entre los dos leptones, la energía transversal faltante (E_T^{miss}) y el momento transverso de los 3 jets que aquí se producen.

ABSTRACT

In this work is have the simulation of a decay channel to search of supersimmetrical particles and kinematic analysis of their main characteristics to see how this change to make to variation of parameters m-Sugra. Using the software PYTHIA 6 are produced a Squark and a Gluino in the proton-proton collision to energy center of mass of 7 TeV and subsequent decay chain with a final state of a lepton pair of opposite sing ($e^-e^+, \mu^-\mu^+$). The analysis of variation of parameters m-Sugra reconstruction is made in mass of leptons pair in final state comming from the decay of boson , the angle of separation between the two leptons, transverse energy missing (E_T^{miss}) and the transverse momentum of the 3 jets produced here.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1. SUPERSIMETRÍA	16
1.1. EL MODELO ESTÁNDAR	16
1.2. SUPERSIMETRÍA	17
1.3. EL MODELO MÍNIMO SUPERSIMÉTRICO (MSSM)	20
1.3.1. Rompimiento de Supersimetría en el MSSM.	20
1.3.2. Paridad-R.	21
1.3.3. m-SUGRA.	22
1.4. PUNTOS DE REFERENCIA PARA LA BÚSQUEDA DE SUPERSIMETRÍA EN CMS	23
1.5. PRODUCCIÓN DE MATERIA SUSY EN EL LHC	24
1.5.1. Canales de producción de Materia SUSY.	24
2. SIMULACIÓN DE EVENTOS SUSY	28
2.1. GENERADOR DE EVENTOS	29

2.2. CANAL DE SIMULACIÓN	30
2.2.1. Producción y cascadas de decaimiento de las Spartículas.	30
2.3. RECONSTRUCCIÓN DE OBJETOS FÍSICOS	33
2.3.1. Eneqía Transversal Flatante (E_T^{Miss}).	34
2.3.2. Estado Final de Dileptones.	35
2.3.3. Jets.	36
3. VARIACIÓN DE PARÁMETROS M-SUGRA (RESULTADOS)	38
3.1. Masa del Par de Dileptones en Estado Final	41
3.2. Búsqueda de Energía transversal Faltante E_T^{Miss}	46
3.3. Búsqueda de Jets	48
4. CONCLUSIONES	51
RECOMENDACIONES	52
BIBLIOGRAFÍA	53
ANEXOS	54

LISTA DE CUADROS

1.1.	Espectro de partículas del MSSM	19
1.2.	Parámetros de búsqueda de supersimetría del experimento CMS bajo el modelo mSUGRA (puntos Low Mass LM)	23
1.3.	Decaimiento de Squarks y Gluinos.	27
2.1.	Parámetros mSugra escogidos para el análisis	34
2.2.	Creación de partículas supersimétricas y sus principales modos de decaimiento	36
3.1.	Valores promedio de la Energía y la velocidad del centro de masa partónico para los diferentes valores de parámetros mSgra	39
3.2.	Valores promedio de la masa de los pares e^-e^+ y $\mu^-\mu^+$ para los diferentes valores de parámetros mSugra y los dos grupos en que se ha dividido el canal.	43
3.3.	Valores promedio de la separación angular del par e^-e^+ y el par $\mu^-\mu^+$ para los diferentes valores de parámetros mSugra y los dos grupos en que se ha dividido el canal.	46
3.4.	Valores de Energía Transversal Faltante promedio para los parámetros mSugra LM2, LM4, LM5, LM6 y LM8.	48
3.5.	Valores promedio momento transverso para los parámetros mSugra LM2, LM4, LM5, LM6 y LM8.	50

LISTA DE FIGURAS

1.1. Las partículas elementales del Modelo Estándar.	18
1.2. Posición de los parámetros elegidos por la colaboración CMS para el modelo mSUGRA en el plano $(m_0, m_{1/2})$	25
1.3. Diagramas de Feynman para producción de Squark-Squark en colisiones Protón-Protón.	26
1.4. Diagramas de Feynman para producción de Squark-Gluino en colisiones de Hadrones.	27
2.1. Canal de decaimiento usado para la simulación de variación de parámetros mSugra	30
2.2. Regiones del plano m_0 contra $m_{1/2}$ que muestra la sección transversal de la producción y principales modos de decaimiento de un Squark y Gluino	31
2.3. Regiones del plano m_0 contra $m_{1/2}$ que muestra los principales modos de decaimiento de $\tilde{\chi}_2^0$	33
3.1. Energía centro de masa partónico para los parámetros mSugra LM2, LM4, LM5, LM6, LM8	39
3.2. Velocidad centro de masa partónico para los parámetros mSugra LM2, LM4, LM5, LM6, LM8	40
3.3. Velocidad centro de masa partónico para los parámetros mSugra LM2, LM4, LM5, LM6, LM8	41
3.4. Canal de decaimiento dividido en 2 grupos para el estudio	41
3.5. Masa Invariante por Dileptones del grupo 1 para los parámetros mSugra LM2, LM4, LM5, LM6, LM8	42

3.6. Masa Invariante par Dileptones del grupo 2 para los parámetros mSugra LM2, LM4, LM5, LM6, LM8	43
3.7. Masa Invariante par Dileptones	44
3.8. Separación Angular par Dileptones	44
3.9. Separación Angular par Dileptones	45
3.10. Masa Invariante par Dileptones	45
3.11. Energía Transversal Faltante	47
3.12. Energía Transversal Faltante	47
3.13. Momento Transverso	49
3.14. Momento Transverso Jets Grupo 2	49

LISTA DE ANEXOS

DESCRIPCIÓN DEL CANAL DE ESTUDIO EN EL PROGRAMA DE SIMULACIÓN PYTHIA 6 Y CÓDIGOS USADOS PARA LA SIMULACIÓN.	54
---	----

GLOSARIO

BACKGROUND: Señal no deseada proveniente del Modelo Estándar.

CMS: (Compact Muon Solenoid) detector de partículas del experimento LHC del CERN.

GUT: (Grand Unification Theory) Teorías de gran unificación de energías.

JET: Chorro de partículas, hadrones, que se mueven a lo largo del quark original.

LHC: (Large Hadron Collider) El gran colisionador de hadrones del laboratorio CERN en Suiza.

LSP: (Lightest supersymmetric particle) partícula supersimétrica mas liviana.

MODELO ESTÁNDAR (ME): Modelo que clasifica las partículas fundamentales que componen la materia y las interacciones que rigen a estas partículas.

MSSM: (Minimal Superimetric Standar Model) Modelo mínimo supersimétrico el cual contiene el menor numero de partículas supersimétricas.

m-Sugra: Modelo de supergravedad que rompe el MSSM en las teorías SUSY.

SUPERSIMETRIA : Extensión del Modelo Estándar que relaciona las propiedades de los bosones y los fermiones.

SPARTICULA: Partícula supersimétrica.

SUSY: Acrónimo ingles de supersimetría.

INTRODUCCIÓN

La idea de que la materia esta compuesta de partículas mas pequeñas se presento desde la era de la antigua Grecia cuando se creía que el átomo era esa partícula fundamental, con el paso del tiempo se fueron postulando partículas mas pequeñas como el electrón, el protón y el neutrón que hacían parte del átomo. Hasta mediados del siglo pasado estas tres eran las partículas que componían toda la materia, luego surgió la idea de nuevas partículas como los quarks, que componen al protón por ejemplo, y en la década de los 70 se construye un modelo en donde se organizan las partículas y las fuerzas que median sus interacciones, a este modelo se le da el nombre de Modelo Estándar (ME). La eficacia de este modelo para la predicción de partículas y sus propiedades se limita cuando solo se puede probar tres de las cuatro fuerzas fundamentales: Electromagnética, Débil y Fuerte, y deja por fuera la fuerza de la Gravedad, a demás, este modelo presenta fallas en la descripción de algunos fenómenos. Nuevas teorías son presentadas con el fin de crear una extensión del ME que pueda solucionar los problemas que este presenta, entre estas teorías la Supersimetría es una de las mas sobresalientes.

La supersimetría es una teoría que adiciona nuevas partículas y las relaciona con las propiedades de los fermiones y los bosones, estas nuevas partículas supersimétricas tendrían una masa mayor que sus compañeras del ME y por tal razón solo son perceptibles en situaciones de aceleradores de partículas a muy altas energías.

En este trabajo de investigación se presenta un estudio para determinar la facilidad de descubrimiento de supersimetría en colisiones protón-protón a energías de 7 TeV en el experimento CMS del LHC. La señal de búsqueda que se estudió fue la producción de un *Squark* y un *Gluino* que decaen vía neutralinos en estados finales de dileptones de signo opuesto y energía transversal faltante con de variación de parámetros mSUGRA en el modelo MSSM. Para el estudio se realizaron simulaciones computacionales para la producción de un *Suark* y un *Gluino* con estos estados finales usando el programa PYTHIA, donde se incluirá las características de variaciones de parámetros y forma de decaimiento de la producción con los estados finales mencionados en el marco de detección del experimento CMS.

Para los diferentes tipos de canales de decaimiento que se producen partir de la colisión protón-protón se utiliza el canal en el que un *Squark* y un *Gluino* decaen vía neutra-
linos y bosones Z en un par lepton-antilepton. La simulación se basa en analizar las
características cinemáticas, con variación de parámetros fijos conocidos en la literatura
como Low Mass.

1 SUPERSIMETRÍA

1.1. EL MODELO ESTÁNDAR

El modelo estándar de la física de partículas es una teoría que describe las relaciones entre las interacciones fundamentales conocidas entre partículas elementales que componen toda la materia. Es una teoría cuántica de campos desarrollada entre 1970 y 1973 que es consistente con la mecánica cuántica y la relatividad especial. Hasta el momento, casi todas pruebas experimentales de las tres fuerzas descritas por el modelo estándar, (Fuerza Electromagnética, fuerza Débil, fuerza Fuerte), están de acuerdo con sus predicciones. Sin embargo, el modelo estándar no es una teoría completa de las interacciones fundamentales debido a que no incluye la gravedad ni la materia oscura, y adicionalmente presenta varios problemas teóricos que sugieren que el modelo estándar es solo una buena aproximación para bajas energías. ¹

El Modelo Estándar (ME, SM: Standard Model), establece las partículas y fuerzas que existen en la naturaleza y cuales son sus propiedades. El ME incorpora lo que se supone es el conjunto total de partículas a partir de las cuales se forma toda la materia existente en el universo. Los valores numéricos del ME, como son la masa de las partículas y sus cargas, son datos que se han obtenido experimentalmente. Uno de los valores que caracterizan a las partículas es su espín, lo interesante del espín es que diferencia claramente a las partículas que forman la materia (fermiones) de las que median la interacción (bosones), los fermiones con espín semientero ($1/2, 3/2$) y los bosones con espín entero ($0, 1$ ó 2). Que el espín sea entero o no marca una importante diferencia de comportamiento entre bosones y fermiones. Las ecuaciones de la mecánica cuántica dicen que dos fermiones "no pueden estar juntos en el mismo estado", mientras que los bosones si.

El ME clasifica a los fermiones en tres familias, cada una de ellas consta de un electrón, un neutrino y dos quarks. A los electrones de las otras dos familias se les llama muón

¹. MORII, T., LIM, C.S., MUKHERJEE, S.N., The Physics of the Standard Model and Beyond, 2004.

y tau (partículas idénticas al electrón, salvo que de mayor masa). Además de estas 12 partículas, existen las correspondientes 12 antipartículas: positrón, antineutrino y antiquarks en cada una de las tres familias. Toda la materia que se conoce está formada por partículas de la primera familia; las partículas de las otras dos familias sólo son visibles en situaciones especiales como en los aceleradores de partículas. A los electrones y neutrinos se les llama genericamente leptones y a la combinación de quarks se les llama hadrones.

Adicionalmente el ME dice también que existen dos fuerzas fundamentales en la naturaleza: la fuerza electro-débil que se transmite por el fotón (bosón de la fuerza electromagnética) y los bosones débiles W^\pm y Z^0 ; La fuerza nuclear fuerte, que se transmite por 8 tipos de partículas llamadas gluones. La figura 1.1 muestra un esquema de cómo esta formado el ME.

El ME también predice la existencia del bosón de Higgs. La importancia de esta partícula radica en que es la encargada de explicar el rompimiento de simetría de masa y por qué las partículas elementales tienen masas tan diferentes.

Sin embargo, como se ha mencionado antes el modelo estándar presenta algunos inconvenientes y uno de los problemas más importantes se encuentra en la masa del Higgs, como esta es una partícula de espín cero generaría un campo radicalmente diferente al producido por los fermiones o los bosones vectoriales. Otros de los problemas teóricos es el hecho de que la gravedad no es incluida en esta teoría, tampoco explica la diferencia de intensidades que tienen las fuerzas. Para resolver estos y otros muchos problemas se han propuesto varios modelos, entre los cuales se encuentran los modelos supersimétricos que son basados en una extensión de la simetría de Poincaré y que resuelven satisfactoriamente estos problemas.

1.2. SUPERSIMETRÍA

En la física de partículas, la supersimetría es una simetría hipotética que relacionaría las propiedades de los bosones y los fermiones. Aunque todavía no se ha verificado experimentalmente que la supersimetría sea una simetría de la naturaleza, es parte

Three Generations
of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass	3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV	0
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	6 MeV	95 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2 eV	<0.19 MeV	<18.2 MeV	90.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force
	0.511 MeV	106 MeV	1.78 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force

Bosons (Forces)

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

fundamental de muchos modelos teóricos, incluyendo la teoría de supercuerdas. La supersimetría también es conocida por el acrónimo inglés SUSY. Una de las predicciones más interesantes de la supersimetría es la existencia de la partícula supersimétrica más liviana (LSP por sus siglas del inglés) llamada neutralino que podría explicar el problema de la materia oscura en el universo.

La supersimetría extiende el número de partículas del ME de forma que a cada partícula le corresponde una compañera supersimétrica denominada súper compañera. Según el ME establece como se comportan las partículas elementales bajo las leyes de la estadística que obedecen, esto es, las que obedecen el campo de la estadística de Fermi-Dirac (fermiones) y las que obedecen la estadística de Bose-Einstein (bosones); En los modelos supersimétricos, a cada partícula de Dirac en el ME se le asigna una compañera escalar y a cada boson una compañera Dirac. Los dos campos (dobletes de partículas) son combinados dentro de un supercampo que contiene las partículas y sus supercompañeras, Spartículas.

Las súpercompañeras de los fermiones son los bosones y tienen un prefijo *s*; así, el

Partículas ME			Spartículas		
Nombre	Simbolo	Espin	Nombre	Simbolo	Espin
quark	q	1/2	s-quark	\tilde{q}	0
leptón	l	1/2	slepton	\tilde{l}	0
gluón	g	1	gluino	\tilde{g}	1/2
bosones W	W^\pm	1	winos	\tilde{W}^\pm	1/2
boson Z	Z^0	1	zino	\tilde{Z}^0	1/2
boson Higgs	H	0	higgsino	\tilde{H}	1/2
graviton	G	2	gravitino	\tilde{G}	3/2

Cuadro 1.1: Espectro de partículas del MSSM

electrón tiene como súpercompañera el selectrón y los quarks, los squarks. Los súpercompañeros de los bosones son fermiones con nombres que terminan en el sufijo -ino, así el foton tiene como súpercompañera al fotino y la del gluon es el gluino.

El espín de una Spartícula difiere en media unidad de su compañera, pero por otro lado tienen el mismo número cuántico. Esta simetría entre fermiones y bosones es llamada Supersimetría (SUSY). El cuadro 1.1 presenta el espectro completo de partículas.²

La extensión mínima del modelo estándar que incluye supersimetría se conoce como MSSM (del inglés Minimal Supersymmetric Standard Model). Como ciertamente no se ha observado la duplicación del espectro es posible que esta simetría solo sea respetada de manera aproximada, de tal manera que las partículas supersimétricas tengan masas mayores que las de sus compañeras del ME y por tal razón aun no hayan podido ser observadas en los aceleradores. Esto implica que la supersimetría, de ser cierta, está rota por algún mecanismo. La especificación de dicho mecanismo da lugar a diversas simplificaciones del MSSM ³.

²R.J.Genik, The Search for Di-Lepton Signatures from Squarks and Gluinos in ppbar collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV. PhD thesis, Michigan State University. Department of Physics and Astronomy., 1998. pag 6

³Richard Genik. The Search for Di-Lepton Signatures from Squarks and Gluinos in ppbar collisions at $\sqrt{s}=1.8$ TeV. PhD thesis, Michigan State University. Department of Physics and Astronomy., 1998.

1.3. EL MODELO MÍNIMO SUPERSIMÉTRICO (MSSM)

El Modelo Mínimo Supersimétrico (MSSM) es un modelo que permite hacer un tratamiento fenomenológico de supersimetría, es decir, que los cálculos teóricos puedan complementarse con resultados experimentales de manera que se pueda comprobar la teoría y, al mismo tiempo, utilizar estos datos para seguir contribuyendo con la misma. El MSSM tiene el espectro de partículas más sencillo dentro de la teoría SUSY. Su grupo de norma es $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ y contiene 3 generaciones de quarks y leptones (como el ME, además de sus respectivas súpercompañeras). La principal característica de esta teoría es que predice una transformación que lleva de estados fermiónicos a estados bosónicos, haciendo de estos una equivalencia.

Los grados de libertad se duplican, prediciendo nuevas partículas supersimétricas, los cuales tendrían la misma masa y acoplamiento que las partículas conocidas del ME; esto en principio, ya que como consecuencia del rompimiento de supersimetría, la masa de los súpercompañeros son mayores. Además, las partículas supersimétricas tienen una diferencia de espín de media unidad ($1/2$) con respecto a las partículas del ME, resultando que los súpercompañeros de los bosones pertenecen al sector fermiónico.

1.3.1. Rompimiento de Supersimetría en el MSSM. En el modelo MSSM la supersimetría se rompe de manera "suave", conservando las propiedades supersimétricas, de forma que las masas de las súpercompañeras estén dadas en términos de una sola escala según las hipótesis usuales de las teorías de gran unificación (GUT) ⁴. Las consecuencias de este rompimiento suave de SUSY son:

1. Que las escalas de masa para las súpercompañeras, a bajas energías (escala QED), sean mayores que las masas de las partículas del ME y, restringiendo, que la mitad de las masas de las partículas generadas sean precisamente las del ME.
2. Que las matrices de masa para las partículas supersimétricas pueden mezclar partículas que llevan los mismos valores del número cuántico conservado. Así, a las partículas supersimétricas se les asignan solamente *eigenestados de interacción*; los *eigenestados correctos de masa* se tendrán que determinar después de analizar

⁴ H.E. Haber, G.L. Kane. The Search For Supersymmetry: Proing Physics Beyond The Standard Model (Ed. North-Holland - Amsterdam, 1984) pp. 84-85.

dichas matrices, cuya simplificación requiere además la inclusión de un modelo teórico para dicho rompimiento.

3. Reducir al mínimo los parámetros incluidos por SUSY, que son más de 100^5 .

1.3.2. Paridad-R. En el modelo supersimétrico MSSM se introduce una simetría especial llamada paridad-R que es una cantidad que se conserva. La paridad-R está definida como:

$$R = (-1)^{3B+L+2S} \quad (1.1)$$

donde B es el número bariónico, L es el número leptónico y S es el espín de la partícula. Por consiguiente R es igual a 1 para todos los leptones y los quarks; y es igual a -1 para sus súpercompañeras debido al factor $(-1)^{2S}$. La conservación de la paridad-R tiene las siguientes consecuencias:

- La partícula supersimétrica mas liviana (LSP) es estable, ya que el decaimiento a materia ordinaria cambiaría la paridad-R. Adicionalmente, si la partícula LSP no tiene carga, es candidato perfecto a materia oscura. Además, respecto a la producción de partículas supersimétricas en colisionadores de hadrones, una vez se produce una partícula LSP, esta no podría decaer en partículas conocidas del ME.
- El decaimiento de productos de partículas súpercompañeras debe contener un número impar de LSPs. Esta es una característica de la producción de materia SUSY en el LHC, que puede ser usada para distinguir eventos que provienen de partículas SUSY a eventos que provienen del ME.
- Las súpercompañeras de las partículas del ME deben ser producidas en pares. En consecuencia si la paridad-R se conserva, siempre se deben producir al menos dos LSPs en eventos SUSY⁶.

⁵J.E.Barradas Guevara, M.Gómez, Decaimientos de sneutrinos, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, REVISTA MEXICANA DE FÍSICA, 2002, pag 243

⁶A.L.C. MORA, BÚSQUEDA DE SQUARKS CON ESTADOS FINALES DE DIMUONES DE SIGNO OPUESTO, JES Y ENERGÍA TRANSVERSA FALTANTE A $\sqrt{s} = 7$ TEV EN EL EXPERIMENTO CMS, Tesis de maestría, Universidad de los Andes, 2010, pag 8

Se considera que la LSP debe ser el neutralino más ligero $\tilde{\chi}_1^0$, por lo que se espera que sea observada SUSY a través de un conjunto de eventos supersimétricos que deberán de decaer en partículas del ME y un número par de $\tilde{\chi}_1^0$. Como el $\tilde{\chi}_1^0$ es masivo e interactúa débilmente, será invisible a los detectores, pudiendo manifestarse a través de energía perdida.

1.3.3. m-SUGRA. El mecanismo exacto de rompimiento de Supersimetría es desconocido. En la Supersimetría, hay un número de rompimientos suaves de parámetros de masa. "Suave" significa que ellos rompen las masas degeneradas entre partículas y spartículas sin reintroducir divergencias cuadráticas.⁷

Se necesita un número muy grande de parámetros para generar un rompimiento de la simetría. Este número de parámetros puede ser reducido asumiendo que muchos de estos parámetros son iguales en escalas muy grandes de energía. Para este propósito se han desarrollado varios enfoques; en este trabajo se considera el modelo mSUGRA (Minimal Supergravity). En este modelo la supersimetría está rota por un acoplamiento a una teoría de supergravedad aún desconocida, donde se asume una unificación a la escala de MGUT y con esto se logra reducir el número de parámetros libres drásticamente. Estos parámetros son:

- $m_0 \equiv$ Representa la masa común escalar.
- $m_{1/2} \equiv$ Representa la masa común del gaugino.
- $A_0 \equiv$ Representa el parámetro de interacción trilineal débil.
- $\tan\beta \equiv$ Representa el cociente de los valores esperados del vacío de Higgs.
- $\text{Signo}(\mu) \equiv$ Representa el parámetro de masa del Higgsino.

⁷R.J.Genik, The Search for Di-Lepton Signatures from Squarks and Gluinos in ppbar collisions at $\sqrt{s} = 1,8$ TeV. PhD thesis, Michigan State University. Department of Physics and Astronomy., 1998. pag 6

1.4. PUNTOS DE REFERENCIA PARA LA BÚSQUEDA DE SUPERSIMETRÍA EN CMS

Para realizar la búsqueda en el espacio de parámetros de mSugra el grupo SUSY/BSM (Supersimetría y Física mas allá del Modelo Estándar) dentro de la colaboración CMS escogió un conjunto de parámetros fijos (benchmarks). Este conjunto de parámetros escogidos se encuentra dividido en dos clases: de masas bajas (Low Mass LM) y de masas altas (High Mass HM). Los primeros puntos fueron destinados para hacer una prueba de la sensibilidad del experimento CMS a la detección de Supersimetría en los primeros años de corrida a baja luminosidad. Los puntos de masas altas se diseñaron para una búsqueda de supersimetría cuando el experimento ya haya acumulado varios años de corridas con alta luminosidad. Los valores de los parámetros de mSugra para cada punto se pueden ver en el cuadro 1.2, mientras que la posición de estos parámetros en el plano $(m_0, m_{1/2})$ se puede ver en la figura 1.2. Estos puntos cubren una basta región de las posibles fenomenologías dentro del modelo mSugra ⁸.

Punto	$m_0(\text{GeV})$	$m_{1/2}(\text{GeV})$	$\tan \beta$	sign (μ)	A_0
LM ₀	200	160	10	+	-400
LM ₁	60	250	10	+	0
LM ₂	185	350	35	+	0
LM ₃	330	240	20	+	0
LM ₄	210	285	10	+	0
LM ₅	230	360	10	+	0
LM ₆	85	400	10	+	0
LM ₇	3000	230	10	+	0
LM ₈	500	300	10	+	-300
LM ₉	1450	175	50	+	0

Cuadro 1.2: Parámetros de búsqueda de supersimetría del experimento CMS bajo el modelo mSUGRA (puntos Low Mass LM)

⁸Yu. M. Andreev, S.I. Bitjukov, N. V. Krasnikov, and A.Ñ. Toropin. Using the $e + - mu - + + E(T)(\text{miss})$ signature in the search for supersymmetry and lepton flavour violation in neutralino decays. Phys. Atom. Nucl., 70:1717?1724, 2007

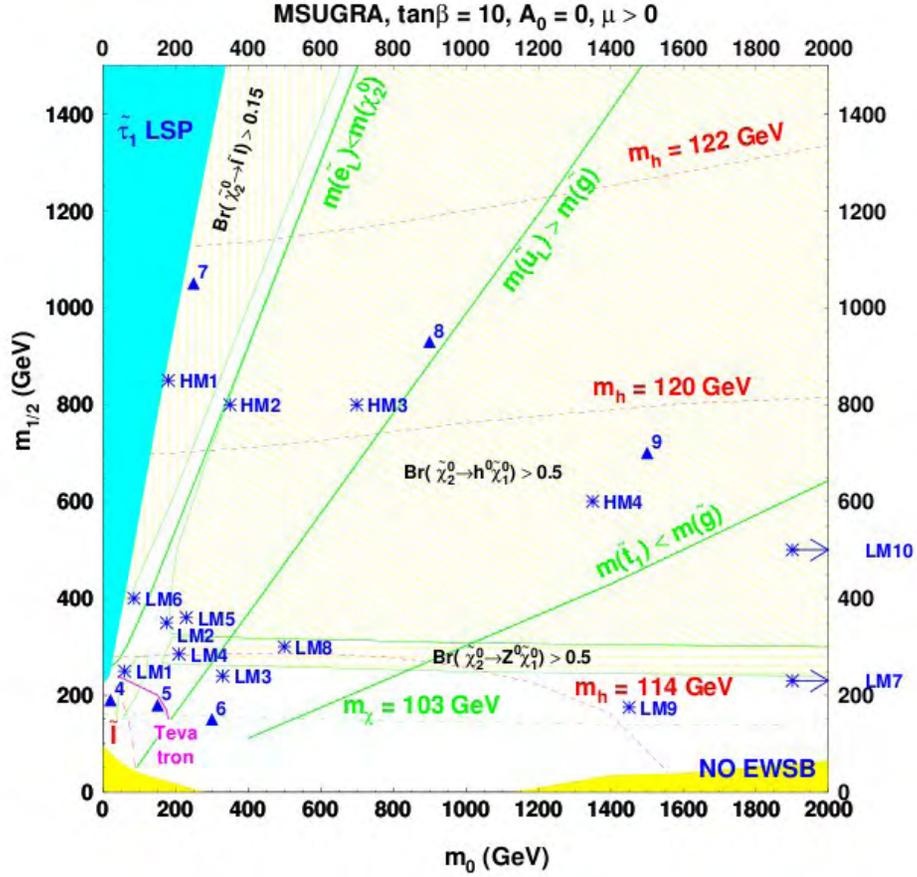
1.5. PRODUCCIÓN DE MATERIA SUSY EN EL LHC

A las energías del LHC se espera que la producción de partículas SUSY sea dominada por la creación de squarks y gluinos. Como los squarks y gluinos son partículas con carga de color, entonces son producidos por la interacción fuerte con una sección eficaz similar a la de procesos de QCD en la misma escala. Una buena aproximación es que la sección eficaz de producción solo depende de las masas de las partículas y por lo tanto es independiente del modelo SUSY empleado. Mientras que los decaimientos de partículas SUSY dependen críticamente de los detalles del modelo SUSY en consideración, tales como el espectro de masas y de los cocientes de desintegración. Sin embargo, algunas características generales se pueden evidenciar. Asumiendo que la paridad-R se conserva (ver sección 1.3.2), la cadena de decaimientos debe finalizar con la partícula supersimétrica mas liviana (LSP), que escapa a la detección, lo que conlleva a la producción de energía transversal faltante. Asumiendo que los squarks y gluinos son partículas muy masivas, se esperan largas cadenas de decaimientos con la producción de varios jets y/o leptones. Una búsqueda genérica se puede realizar usando como parámetros de selección de eventos aquellos que tienen gran energía transversal faltante, jets y determinado número de leptones; el presente trabajo está enfocado específicamente en la producción de energía trasversal faltante y dos leptones de signo opuesto en el estado final.

1.5.1. Canales de producción de Materia SUSY. En colisiones protón-protón a las energías del LHC, se espera que los Squarks sean producidos como resultado de interacciones partón-partón; como los partones llevan una fracción del momento del protón, la energía disponible para la producción de nuevas partículas será menor que la energía del centro de masa.

Dependiendo de la jerarquía de masas de los squarks y gluinos, en la colisión pp se espera diferentes pares de procesos de producción vía interacción fuerte, Según esto tenemos los siguientes casos:

- Si: $m_{\tilde{q}} \ll m_{\tilde{g}} \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}$
- Si: $m_{\tilde{g}} \ll m_{\tilde{q}} \rightarrow \tilde{g}\tilde{g}$
- $\tilde{q}\tilde{g}$ Si las masas del squark y el gluino son similares.



R

Figura 1.2: Posición de los parámetros elegidos por la colaboración CMS para el modelo $mSUGRA$ en el plano $(m_0, m_{1/2})$. Tomado: *CMS Physics Technical Design Report, Volume II: Physics Performance, CERN/LHC 2006-021, p 408.*

- Si: $m_{\tilde{q}} < m_{\tilde{g}}$, se espera que los squarks decaigan directamente en un quark y un gaugino, $\tilde{q} \rightarrow \tilde{\chi}$, donde $\tilde{\chi}$ es dominante mente $\tilde{\chi}_1^0$ para \tilde{q}_R y $\tilde{\chi}^\pm$ o $\tilde{\chi}_2^0$ para \tilde{q}_L .
- Si $m_{\tilde{g}} < m_{\tilde{q}}$, se espera que los gluinos decaigan a través del intercambio de un squark virtual produciendo un quark, un antiquark y un gaugino $\tilde{g} \rightarrow q\bar{q}\tilde{\chi}$, donde $\tilde{\chi}$ es típicamente $\tilde{\chi}^\pm$ ó $\tilde{\chi}_2^0$ ⁹.

En el caso de producción de squark-squark, la interacción de origen puede ser quark-quark, quark-antiquark ó gluón-gluón; estos canales producirían squarks a diferentes tasas debido a las diferencias en secciones eficaces para cada interacción.

⁹J. L. Feng, J.-F. Grivaz, and J. Nachtman. Searches for supersymmetry at high-energy colliders. *Reviews of Modern Physics*, 82:699-727, January 2010

Para producir parejas squark-gluino debe suceder una interacción entre un quark y un gluón.

La producción gluino-gluino se produce cuando hay una aniquilación quark-antiquark o una interacción gluón-gluón¹⁰.

Los diagramas de Feynman para la producción de Squarks y Gluinos se puede observar en las figuras 1.3 y 1.4.

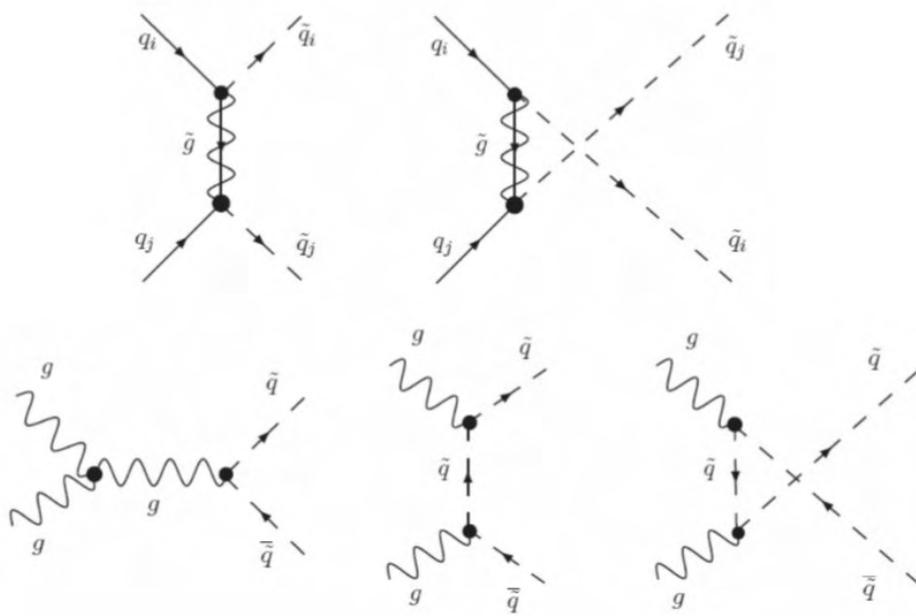


Figura 1.3: Diagramas de Feynman para producción de Squark-Squark en colisiones Protón-Protón. Tomado: Lina Huertas Guativa, *Producción de S-quarks y Gluinos en el Experimento CMS*, Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Programa de Física, San Juan de Pasto, 2009, p 24.

La mayoría de canales de decaimiento de gluinos y squarks involucra charginos y neutralinos. Estas partículas a su vez decaerían en la LSP (que sería el neutralino más liviano). El decaimiento de neutralinos es mediado por la producción de bozones Z; los cuales pueden decaer en un par de leptones de signo opuesto¹¹; El cuadro 1.3 muestra los

¹⁰A.A.Ocampo, Search for Squarks and Gluinos events with muons, Jets and Missing Transverse Energy in pp collisions using the CMS detector. Ph.D Thesis Proposal, Universidad de los Andes, Departamento de Física, 2008

¹¹A.A.Ocampo, Search for Squarks and Gluinos events with muons, Jets and Missing Transverse Energy in pp collisions using the CMS detector. Ph.D Thesis Proposal, Universidad de los Andes, Departamento de Física, 2008

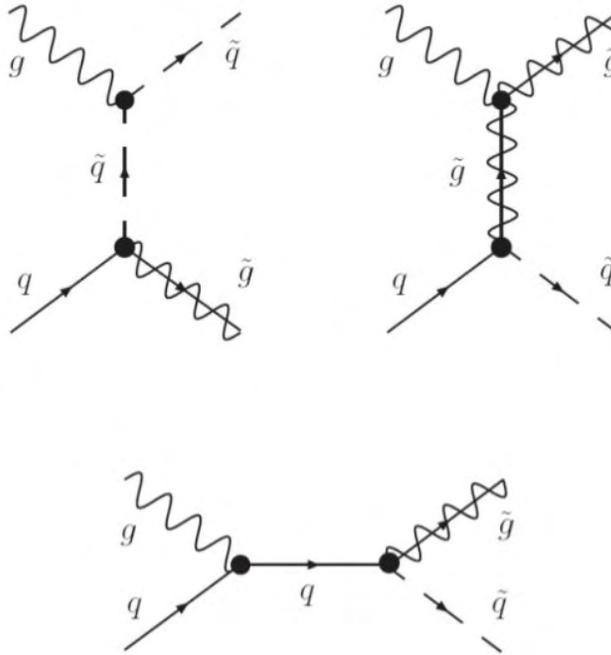


Figura 1.4: Diagramas de Feynman para producción de Squark-Gluino en colisiones de Hadrones. Tomado: Lina Huertas Guativa, Producción de S-quarks y Gluinos en el Experimento CMS, Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Programa de Física, San Juan de Pasto, 2009.p 25

canales esperados de decaimiento para gluinos y squarks dependiendo de la diferencia de masas entre el gluino y el squark.

Si $m_{\tilde{q}} < m_{\tilde{g}}$	Si $m_{\tilde{q}} > m_{\tilde{g}}$
$\tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}$	$\tilde{q} \rightarrow q\tilde{g}$
$\tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$	$\tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$
$\tilde{q} \rightarrow q'\tilde{\chi}_k^\pm$	$\tilde{q} \rightarrow q'\tilde{\chi}_k^\pm$
$\tilde{q} \rightarrow q\bar{b}\bar{b} + q\bar{b}\bar{b}$	$\tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}\tilde{\chi}_1^0$
	$\tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}'\tilde{\chi}_k^\pm$
	$\tilde{g} \rightarrow t\bar{t} + b\bar{b}$
	$\tilde{g} \rightarrow \bar{b}\bar{b} + b\bar{b}$

Cuadro 1.3: Decaimiento de Squarks y Gluinos.

2 SIMULACIÓN DE EVENTOS SUSY

La primera parte en un proceso de simulación en el experimento CMS es simular una colisión protón-protón y determinar la respuesta del detector al paso de diferentes partículas generadas; los resultados obtenidos por el detector durante este proceso son señales digitales, es decir, la primera fase de simulación consiste en la obtención de estas señales digitales. La siguiente fase es hacer una reconstrucción de los objetos físicos a partir de la simulación cruda, aquí, las señales digitales que se obtienen en el detector son reconstruidas en objetos físicos, sea un electrón, un jet, un muón, etc, todo esto con ayuda de diferentes algoritmos. Este proceso se realiza usando las huellas dejadas por las diferentes partículas en el detector, como la energía depositada en los diferentes calorímetros del experimento, el ángulo de salida, la distancia recorrida por la partícula, etc.

Las siguientes fases de la simulación consisten en hacer análisis cada vez más detallados sobre los objetos físicos reconstruidos con filtros específicos para las señales de interés, haciendo exigencias sobre variables físicas que permitan rechazar en un alto porcentaje las señales de background, comparadas con las señales físicas que se están buscando. La Energía Transversal Faltante (E_T^{miss}) es una señal de gran interés en el análisis debido a que a muy altas energías la presencia de una gran cantidad de E_T^{miss} no es explicada claramente por el modelo estándar y si se obtuvieran resultados reales en el experimento con gran cantidad de energía transversal faltante sería una clara evidencia de física mas allá del modelo estándar. En los modelos supersimétricos esta energía transversal faltante es explicada por la la postulación de la existencia de varias partículas masivas neutras, los neutralinos ($\tilde{\chi}_i^0$, $i = 1,2,3,4$) que interactúan débilmente y que por tanto escapan a la detección en el experimento, y la mas estable de estas partículas es un candidato perfecto a materia oscura.

El número de jets producido (de alto momento transverso) y los leptones de signo opuesto son importantes a la hora de reconstruir que tipos de decaimiento ocurrieron en la colisión. En los modelos supersimétricos se predicen decaimientos que involucran energía transversal faltante, jets y leptones de signo opuesto; por lo cual es importante determinar estas variables para comparar como sería su comportamiento en una coli-

si3n prot3n-prot3n de altas energ3as y determinar si nos encontramos ante un proceso producido por el modelo est3andar o si estamos frente a un proceso que solo podr3a ser explicado por teor3as m3s all3 de este modelo como supersimetr3a.

2.1. GENERADOR DE EVENTOS

La generaci3n de eventos que son creados en la colisi3n como entrada a la simulaci3n del detector son escritos en programas de simulaci3n, en este trabajo el generador de eventos empleado es PYTHIA, programa usado para generar eventos de f3sica de altas energ3as, el programa simula el conjunto de part3culas producidas debido a la interacci3n entre dos part3culas de entrada (en este caso dos protones). El objetivo del programa es reproducir de la forma mas precisa posible una representaci3n de las propiedades de los eventos en un amplio rango de reacciones generadas en el Modelo Est3andar y en modelos f3sicos m3s all3 de este modelo (en este caso el modelo mSUGRA), con 3nfasis en aquellos eventos donde la interacci3n fuerte juega un rol importante directa o indirectamente y por consiguiente se producen estados finales multihadr3nicos.

PYTHIA se basa en una combinaci3n de resultados anal3ticos y modelos basados en QCD, ya que este tipo de procesos con estos estados finales no han sido entendidos completamente para dar una descripci3n exacta de lo que sucede. El 3nfasis de este programa es la producci3n de m3ltiples part3culas en colisiones de part3culas elementales, en particular las interacciones fuertes en colisiones e^+e^- , pp y ep. El programa se ha dise1ado para generar los eventos por completo, en mucho m3s detalle que las observables experimentales, en los l3mites de nuestro actual entendimiento de este tipo de f3sica. Muchos componentes del programa representan investigaci3n innovadora, teniendo en cuenta que algunos de los modelos desarrollados e implementados han sido desarrollados para aspectos que no son cubiertos por las teor3as est3andar actuales ¹

Los resultados de la simulaci3n son sacados en histogramas, en este trabajo se utiliza el programa ROOT el cual hace una interfaz con PYTHIA y almacena los datos en un archivo de extensi3n .root, posteriormente estos archivos son le3dos por ROOT y se saca el histograma que es la parte gr3fica donde se puede analizar los resultados de la simulaci3n.

¹T.Sjostrand, S. Mrenna, and P. Skands. PYTHIA 6.4 physics and manual. Journal of High Energy Physics, 5:26?+, May 2006.

ROOT es un software para analizar datos desarrollado en el CERN (e inspirado en las actividades de física de altas energías). Este programa es rico en un conjunto de herramientas para la adquisición de datos, procesamiento y análisis implementado como librerías C++.²

2.2. CANAL DE SIMULACIÓN

Para la búsqueda de señales experimentales en las cuales se presenten partículas SUSY en este trabajo se hace la simulación de la producción de un Squark y un Gluino que decaen vía neutralinos y bosones Z en un par de leptones de signo opuesto ($\mu^- \mu^+$, $e^- e^+$), el canal se puede mirar en la figura 2.1.

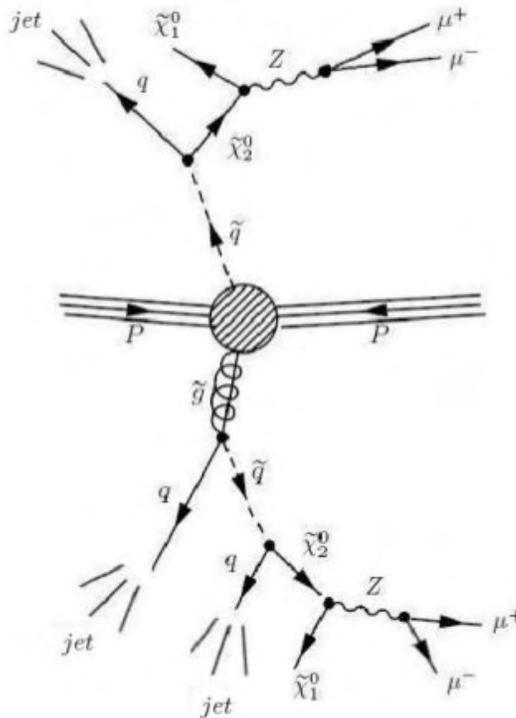


Figura 2.1: Canal de decaimiento usado para la simulación de variación de parámetros $mSugra$. Fuente de esta investigación

2.2.1. Producción y cascadas de decaimiento de las Spartículas. Si se asume que la Supersimetría es descubierta en el LHC, lo mas probable es que se hagan estudios

²ROOT-An Object Oriented Data Analysis Framework, Users Guide 5.20,2008

basados en gran cantidad de energía faltante y jets, sera muy importante investigar todas las formas típicas SUSY para ayudar a fijar el modelo subyacente.

Si los Squaks y/o Gluinos son cinemáticamente asequibles en el LHC, están esperados a tener largos radios de producción. La sección transversal para la producción de un Squark (excluyendo el Stop) o un Gluino en el LHC son presentadas en la figura 2.2. Las líneas diagonales delimitan 3 regiones:

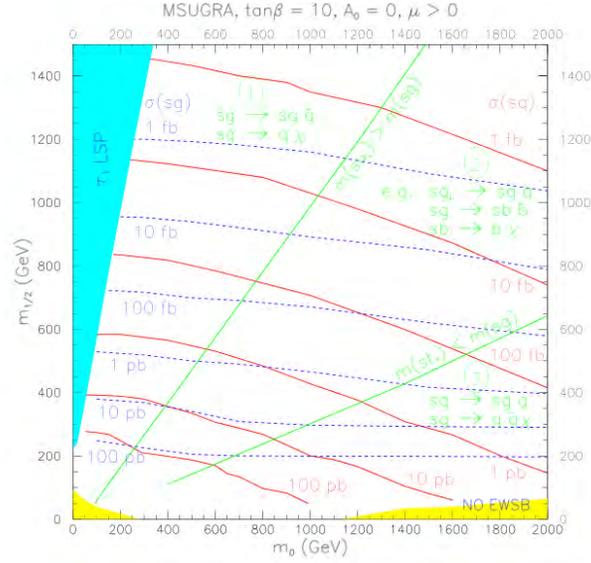


Figura 2.2: Regiones del plano m_0 contra $m_{1/2}$ que muestra la sección transversal de la producción y principales modos de decaimiento de un Squark y Gluino. Tomado: CMS Physics Technical Design Report, Volume II: Physics Performance, CERN/LHC 2006-021, p 405.

- Región 1: En esta región, los Gluinos son mas pesados que cualquiera de los Squarks. Se espera que las cadenas de decaimiento de las spartículas sean:

$$\tilde{g} \rightarrow \tilde{q}\bar{q} \quad \tilde{q} \rightarrow q\chi \quad (2.1)$$

- Región 2: En esta región algunos Squarks son mas pesados, otros son mas livianos que el Gluino. Por lo tanto cadenas bastante complicadas de decaimiento son posibles, por ejemplo:

$$\tilde{q}_L \rightarrow \tilde{g}q \quad \tilde{g} \rightarrow \tilde{b}\bar{b} \quad \tilde{b} \rightarrow b\chi \quad (2.2)$$

se espera que las dos primeras generaciones \tilde{q}_L sean las mas pesadas y \tilde{b}_1 (y \tilde{t}_1) los mas livianos.

- Región 3: En esta región, el Gluino es más liviano que cualquiera de los Squarks. Una típica cadena de decaimiento es

$$\tilde{q} \rightarrow \tilde{g}q \quad \tilde{g} \rightarrow q\bar{q}\chi \quad (2.3)$$

donde el gluino da lugar a un decaimiento de los tres cuerpos mediada por un squark virtual.

Los principales modos de decaimiento de $\tilde{\chi}_2^0$ son

$$\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{l}l \quad (2.4)$$

$$\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\nu}\nu \quad (2.5)$$

$$\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow h^0\tilde{\chi}_1^0 \quad (2.6)$$

$$\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow Z^0\tilde{\chi}_1^0 \quad (2.7)$$

$$\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow l^+l^-\tilde{\chi}_1^0 \quad (2.8)$$

donde el último decaimiento está mediado por el intercambio de un Z^0 o \tilde{l} . El primer decaimiento corresponde a una interacción gauge acoplando un Wino a un par slepton-lepton y domina si es cinemáticamente permitido. Cuando este decaimiento es cinemáticamente prohibido y $m_{1/2}$ es lo suficientemente grande, así que $m(\tilde{\chi}_2^0) - m(\tilde{\chi}_1^0) > m(h^0)$, el siguiente decaimiento preferido es h^0 . Esto corresponde a una transición gaugino-Higgsino y por lo tanto requiere una componente Higgsino diferente de cero en al menos uno de los dos neutralinos. Si este tipo de decaimiento es cinemáticamente prohibido y la diferencia de masa del neutralino es suficiente, el $\tilde{\chi}_2^0$ decae a un Z^0 el cual es suprimido en comparación al decaimiento de h^0 porque se acopla a la componente Higgsino de ambos neutralinos. Cuando también este decaimiento es cinemáticamente prohibido, directamente el decaimientos de tres cuerpos toma lugar. La correspondiente región en el plano m_0 contra $m_{1/2}$ son ilustrados para el caso mSugra en la figura 2.3 ³.

³CMS Physics Technichal Design Report, Volume II: Physics Performance, CERN/LHC 2006-021, p405-406.

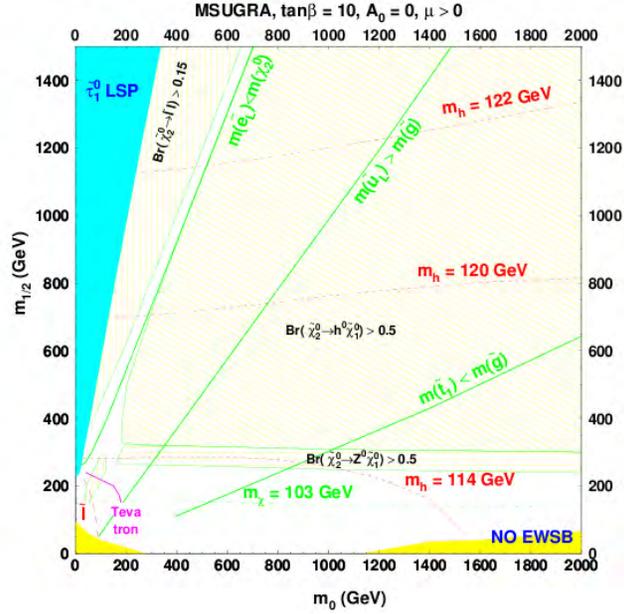


Figura 2.3: Regiones del plano m_0 contra $m_{1/2}$ que muestra los principales modos decaimiento de $\tilde{\chi}_2^0$. Tomado: CMS Physics Technical Design Report, Volume II: Physics Performance, CERN/LHC 2006-021, p 406.

El objetivo del trabajo es observar las diferencias que existen cuando se simula el canal de la figura 2.1 para diferentes parámetros mSUGRA, específicamente se hace esto con los parámetros LM2, LM4, LM5, LM6 y LM8 que aparecen en el cuadro 1.2 del capítulo anterior. Se toman estos parámetros por las características del canal, esto es, se toman los parámetros de las regiones 1 y 2 de la figura 2.2 ya que se asume que la masa del Gluino es mayor que la masa de los Squarks (región 1) y que algunos Squarks son de mayor masa que el Gluino (región 2). La línea roja punteada de la figura 2.3 también da un límite para la escogencia de los puntos LM, los seleccionados son los que están en la zona $\text{Br}(\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \text{Z}^0 \tilde{\chi}_1^0) > 0,5$. En la figura 1.2 se puede observar que los puntos que cumplen estas condiciones son LM2, LM4, LM5, LM6 y LM8, éstos son escritos en el cuadro 2.1.

2.3. RECONSTRUCCIÓN DE OBJETOS FÍSICOS

En la reconstrucción de objetos físicos durante la corrida de una colisión de hadrones está caracterizada por la presencia de gran cantidad de partículas, cada una de ellas con sus propias características; el entendimiento de estas características conduce

m_0	$m_{1/2}$	A_0	$\tan(\beta)$	$Singo(\mu)$
185	350	35	+	0
210	285	10	+	0
230	285	10	+	0
85	400	10	+	0
500	300	10	+	-300

Cuadro 2.1: Parámetros mSugra escogidos para el análisis

al desarrollo de algoritmos de identificación y reconstrucción, en el desarrollo de este trabajo la búsqueda está centrada en tres objetos físicos específicos (E_T^{miss} , estado final de dileptones y jets), para ello se da las principales características de éstos.

2.3.1. Energía Transversal Flatante (E_T^{Miss}). En una colisión de hadrones, muchas partículas neutras son producidas, como los neutrinos, estas interactúan débilmente y escapan de los detectores del colisionador sin producir ninguna respuesta directa en los elementos detectores. La presencia de estas partículas debe deducirse del desequilibrio de la cantidad de movimiento total. El desequilibrio del vector momento en el plano perpendicular a la dirección del haz de partículas incidentes es muy útil en colisiones pp y $p\bar{p}$, y es conocido como momento transversal perdido, aquí se denota como (PT). Su magnitud es llamada Energía Transversal Faltante (E_T^{Miss})⁴.

El detector CMS tiene una cobertura de ángulo sólido cercano a 4π , pero no es completamente hermético, ya que no se puede cubrir las aberturas por donde viene los haces de protones. El balance total de energía no se puede usar, ya que partículas de bajo momento escapan a la detección en la dirección del haz. Sin embargo como aquellas partículas tienen momento transversal pequeño, el detector permite realizar una prueba precisa de la conservación de momento en el plano perpendicular a la dirección de los haces. Como resultado, cualquier desequilibrio significativo en la medida del momento transversal en el calorímetro es un indicativo de la producción de una partícula que interactúa débilmente en la colisión, lo que indica que este es un proceso de interés.

Dentro del modelo estándar, un desequilibrio de este tipo en el momento transversal

⁴arXiv:1106.5048v1 Missing transverse energy performance of the CMS detector, 24 Jun 2011, pag 1.

indica la presencia de un muón o un neutrino. Sin embargo el momento de un muón puede ser medido con precisión combinando el sistema de rastreo central y el sistema de muones, y así se puede corregir el momento transversal incluyendo el momento del muón. La única partícula del modelo estándar que realmente debería escapar a la detección es el neutrino. En modelos supersimétricos que conservan la paridad R la partícula supersimétrica mas liviana (LSP) es estable, masiva, solo interactúa débilmente y siempre se produce en cascadas de decaimientos de partículas SUSY mas pesadas. La presencia de partículas LSP en eventos SUSY contribuiría a la energía transversal faltante, lo que radica en una importante observable a la hora de identificar eventos SUSY ⁵

La energía transversal faltante esta determinada por la suma vectorial de la energía transversal depositada en las celdas de los calorímetros de la siguiente manera:

$$\vec{E}_T^{miss} = - \sum (E_n \sin \theta_n \cos \theta_n \hat{i} + E_n \sin \theta_n \sin \theta_n \hat{j}) \quad (2.9)$$

$$\vec{E}_T^{miss} = E_x^{miss} \hat{i} + E_y^{miss} \hat{j} \quad (2.10)$$

2.3.2. Estado Final de Dileptones. Todas las partículas supersimétricas son partículas de corta duración, que decaen en partículas ordinarias y en la partícula supersimétrica más liviana (LSP). La diferencia principal respecto a procesos producidos por el background del Modelo Estándar se puede obtener por la energía transversal faltante que proviene de los neutralinos que escapan a la detección. La energía faltante es transportada por la partícula pesada con la masa del orden de 100 GeV, que es esencialmente diferente a los procesos con neutralinos en su estado final. En colisiones de hadrones, las partículas supersimétricas siempre son creadas en pares (debido a la conservación de la paridad-R) y después decaen generando una cascada con quarks ordinarios (jets hadrónicos) o leptones en su estado final más energía faltante.

La búsqueda de supersimetría estándar se puede clasificar por la multiplicidad de los leptones correspondiente a sus estados finales: Energía transversal faltante sin leptones (búsqueda hadrónicas de SUSY), leptón individual ó dileptones y energía transversal

⁵Martin Florian Niegel. Search for Supersymmetry in Trimuon Final States with the CMS Detector. PhD thesis, Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), 2009. pag 58.

faltante, y búsqueda trileptónica.⁶

Los principales modos de decaimiento de partículas supersimétricas y la forma en la que se manifestarían experimentalmente en el LHC se encuentra en el cuadro 2.2.

Creación	Modos de decaimiento principales	Señal
• $\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{q}\tilde{q}, \tilde{g}\tilde{q}$	$\tilde{g} \rightarrow q\bar{q}\tilde{\chi}_1^0$ $q\bar{q}'\tilde{\chi}_1^\pm \quad m_{\tilde{q}} > m_{\tilde{g}}$ $g\tilde{\chi}_1^0$ $\tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_i^0 \quad m_{\tilde{g}} > m_{\tilde{q}}$ $\tilde{q} \rightarrow q'\tilde{\chi}_i^\pm$	E_T^{miss} + multijets (+ leptones)
• $\tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_2^0$	$\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 l^\pm \nu$, $\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 ll$ $\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 q\bar{q}'$, $\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 ll$	trileptones + E_T^{miss} dileptones + jet + E_T^{miss}
• $\tilde{\chi}_1^+ \tilde{\chi}_1^-$	$\tilde{\chi}_1^+ \rightarrow l\tilde{\chi}_1^0 l^\pm \nu$	dileptones + E_T^{miss}
• $\tilde{\chi}_i^0 \tilde{\chi}_i^0$	$\tilde{\chi}_i^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 X \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 X'$	dileptones + jet + E_T^{miss}
• $\tilde{t}_1 \tilde{t}_1$	$\tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$ $\tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 q\bar{q}'$ $\tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 l^\pm \nu$	2 jets no colineales + E_T^{miss} leptón individual + E_T^{miss} + $b's$ dileptones + E_T^{miss} + $b's$
• $\tilde{l}\tilde{l}, \tilde{l}\tilde{\nu}, \tilde{\nu}\tilde{\nu}$	$\tilde{l}^\pm \rightarrow l^\pm \tilde{\chi}_i^0, \tilde{l}^\pm \rightarrow \nu_l \tilde{\chi}_i^\pm$ $\tilde{\nu} \rightarrow \nu \tilde{\chi}_1^0$	dileptones + E_T^{miss} leptón individual + E_T^{miss}

Cuadro 2.2: Creación de partículas supersimétricas y sus principales modos de decaimiento

2.3.3. Jets. Debido a la simetría de color en QCD, solo se puede observar estados finales sin color, un quark o un gluón no se pueden observar directamente. Lo que se observa en el detector es el proceso de hadronización, donde el partón es fragmentado en hadrones sin color; lo que resulta en un flujo de hadrones en un área localizada que es detectada por el sistema de rastreo y el sistema calorímetro hadronico llamado *jet*.

El objetivo de los algoritmos de reconstrucción de jets en colisiones *pp* es reconstruir e identificar los jets que provienen de la hadronización de un partón dispersado, y poder dar así un estimado inicial de la energía del partón y su dirección. La idea de los algoritmos es agrupar todas las partículas originadas del parton inicial en un solo objeto, el jet.

En este trabajo no se hace la reconstrucción de los jets que se producen en el canal

⁶A. V. Gladyshev and D. I. Kazakov. Supersymmetry and LHC. Physics of Atomic Nuclei, 70:1553-1567, September 2007.

de decaimiento seleccionado, solo se hace la reconstrucción del momento transversal de cada uno de ellos y se varían los parámetros mSugra para su análisis.

3 VARIACIÓN DE PARÁMETROS M-SUGRA (RESULTADOS)

Uno de los retos importantes para la colaboración que trabaja en el experimento CMS del LHC es la búsqueda de física mas allá del Modelo Estándar y lo cual involucra en gran medida la teoría de supersimetría (SUSY). En un colisionador de hadrones es importante poder distinguir eventos con partículas SUSY de otro tipo de eventos que producen partículas del Modelo Estándar. En el presente trabajo se hace un análisis de simulaciones colisión protón-protón a energía de centro de masa $\sqrt{s} = 7$ TeV, los protones no son partículas fundamentales y por tal razón se encuentran formados de otro tipo de partículas, quarks y gluones, y cada una de estas partículas lleva una fracción desconocida de la energía total del protón. Esto significa que la energía real del centro de masa en una colisión quark-quark, quark-gluon o gluon-gluon, que son las posibles interacciones reales que se pueden dar en la colisión protón-protón, es mucho menor que la energía centro de masa total del protón, el resto de la energía queda en los remanentes de la colisión, esto es lo que se llama el evento subyacente, estas partículas se fragmentan y producirán piones y gamas, que luego deberán tenerse en cuenta a la hora de calcular la energía faltante.

En este trabajo se hace una simulación en el programa Pythia de una colisión protón-protón a energía de 7 TeV que produce un Gluino y un Squark, esta producción se hace por la interacción de un quark y un gluon como se muestran en la figura 1.4, la energía de los dos partones (gluon y quark) es menor que la energía centro de masa del par de protones que inicialmente colisionan, en la figura 3.1 se muestra el valor de esta energía para los diferentes valores de parámetros mSugra y en la figura 3.2 encontramos el valor de la velocidad del centro de masa partónico al cual se realiza esta colisión para diferentes valores de parámetros mSugra.

En las gráficas se observa que el valor de la energía es mucho menor de los 7 TeV a los que se realiza inicialmente la colisión pero este valor no varia significativamente entre los parámetros estudiados, en el cuadro 3.1 se muestran los valores promedio de la energía y la velocidad para cada parámetro mSugra, en la figura 3.3 se muestra las diferencias de la energía y la velocidad para los 5 parámetros mSugra.

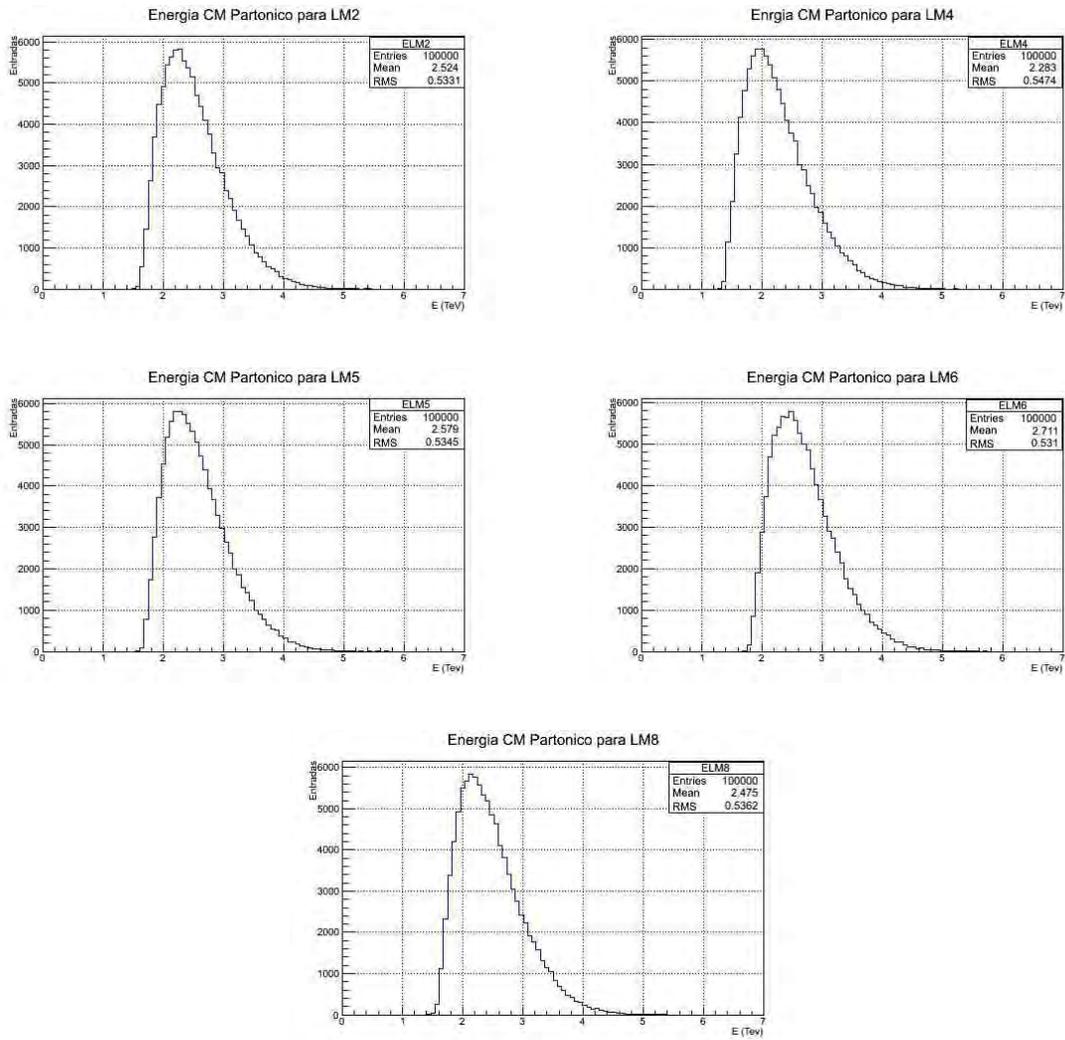


Figura 3.1: Energía centro de masa partónico para los parámetros m_{Sugra} LM2, LM4, LM5, LM6, LM8. Fuente de esta investigación.

P. m_{Sugra}	Energía CM	Velocidad CM
LM2	2.524	0.5951
LM4	2.283	0.6298
LM5	2.579	0.5886
LM6	2.711	0.5726
LM8	2.475	0.6007

Cuadro 3.1: Valores promedio de la Energía y la velocidad del centro de masa partónico para los diferentes valores de parámetros m_{Sugra}

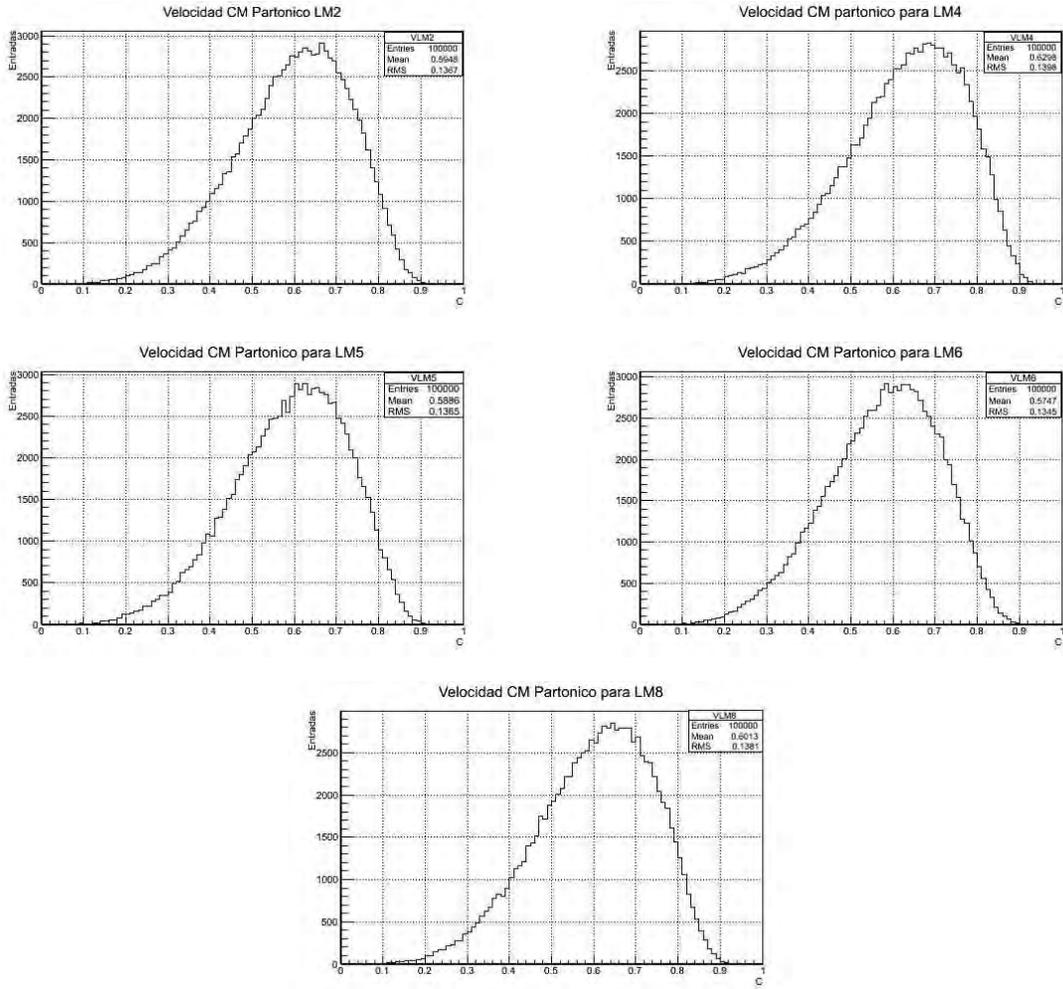


Figura 3.2: Velocidad centro de masa partónico para los parámetros m_{Sugra} LM2, LM4, LM5, LM6, LM8. Fuente de esta investigación.

Para realizar el estudio del canal, éste será dividido en dos grupos con el fin de hacer un análisis de las partículas finales por separado, dependiendo si son producidas por el decaimiento en cadena de un Squark o un Gluino. Este método es usado en muchos análisis, es un algoritmo que permite la separación de cadena de decaimiento de las partículas también llamado *Algoritmo Hemisferico*¹. En la figura 3.4 se muestra el canal de decaimiento separado en 2 grupos.

¹ CMS Physics Technical Design Report, Volumen II: Physics Performance, CERN/LHCC 2006-0-21, p410

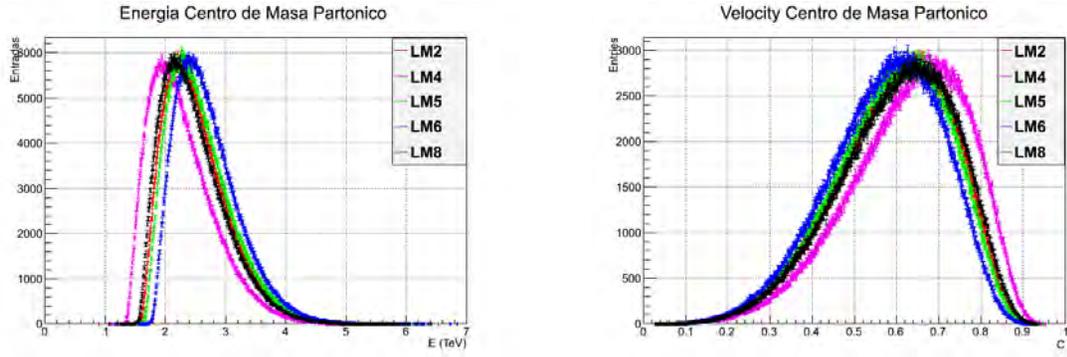


Figura 3.3: Energía y Velocidad centro de masa partónico para los parámetros $mSUGRA$ LM2, LM4, LM5, LM6, LM8. Fuente de esta investigación.

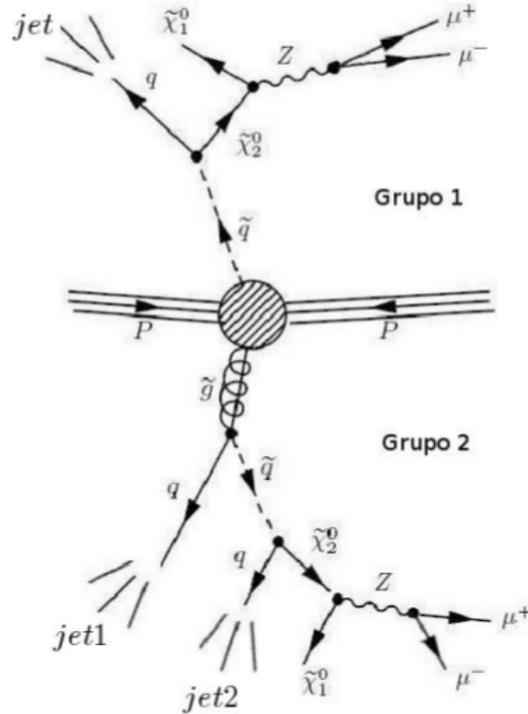


Figura 3.4: Canal de decaimiento dividido en 2 grupos para el estudio. Fuente de esta investigación.

3.1. Masa del Par de Dileptones en Estado Final

La búsqueda de partículas SUSY, se hace en el estado final de un par de leptones de signo opuesto ($\mu^- \mu^+$, $e^- e^+$), energía transversal faltante (E_T^{miss}) y jets.

En la primera parte se usa los decaimientos del Z^0 en par de leptones de signo opuesto

$(\mu^-\mu^+, e^-e^+)$. Para determinar si los leptones se produjeron a partir del boson Z^0 se reconstruye la masa invariante del par de leptones, M_{l-l+} , como se muestra en la siguiente ecuación:

$$M_{l-l+} = \sqrt{(E_{l+} + E_{l-})^2 - (P_{l+} + P_{l-})^2} \quad (3.1)$$

El valor esperado para la masa del par M_{l-l+} debe estar alrededor de 91,18 GeV ya que provienen del decaimiento de un Z^0 .²

En las figuras 3.5 y 3.6 se muestra la masa invariante del par e^-e^+ y $\mu^-\mu^+$ en estado final para el grupo 1 y el grupo 2 con variación de los parámetros mSugra LM2, LM4, LM5, LM6 y LM8 respectivamente. En el cuadro 3.2 se da el valor promedio de la medida de masa del par e^-e^+ y $\mu^-\mu^+$ para cada uno de los parámetros mSugra y para cada grupo.

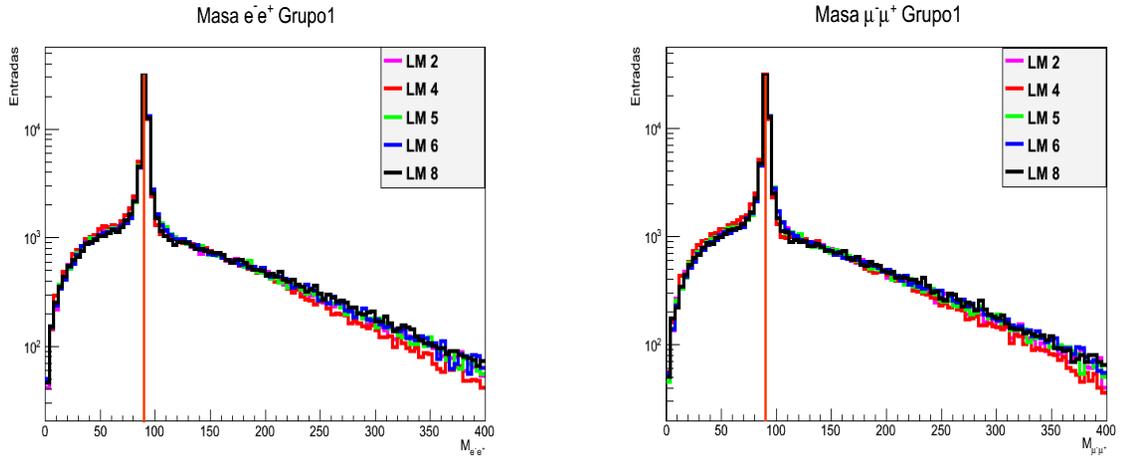


Figura 3.5: Masa Invariante e^-e^+ Grupo 1 (Izquierda) y Masa Invariante $\mu^-\mu^+$ Grupo 1 (Derecha). Fuente de esta investigación.

La línea roja indica un pico en 90 GeV para los valores de masa de cada par leptones (e^-e^+ y $\mu^-\mu^+$) en cada uno de los grupos en que esta dividido el canal, este resultado concuerda con el valor esperado de 91.18 GeV que es el valor experimental de la masa del boson Z^0 , a demás, el valor de masa obtenido se encuentra dentro del intervalo de $81\text{GeV} < M_{\mu\mu} < 96.5 \text{ GeV}$ requerido por el análisis hecho en *CMS Physics Technical*

²Lina Huertas Guativa, Producción de S-quarks y Gluinos en el Experimento CMS, Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Programa de Física, San Juan de Pasto, pag 38

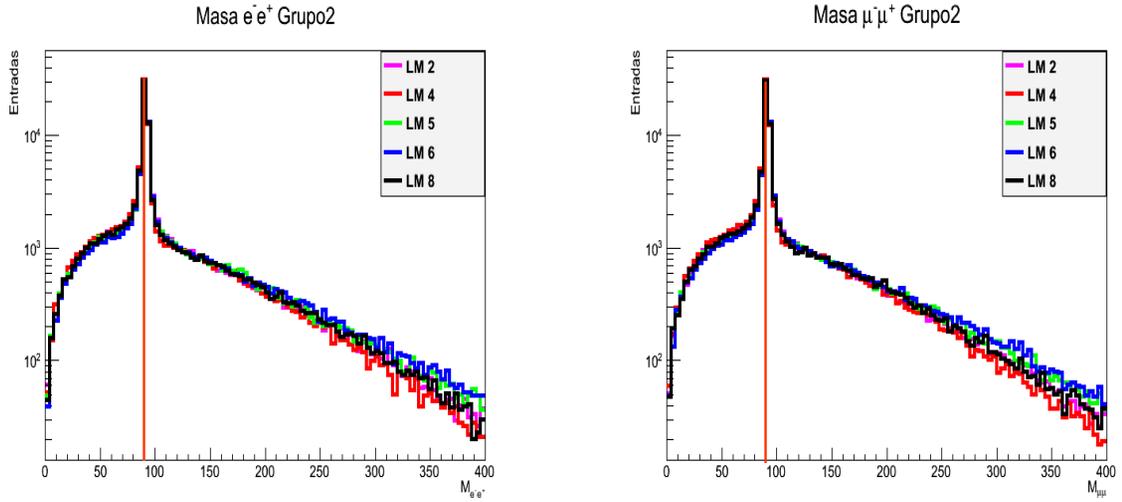


Figura 3.6: Masa Invariante e^-e^+ Grupo 2 (Izquierda) y Masa Invariante $\mu^-\mu^+$ Grupo 2 (Derecha). Fuente de esta investigación.

P. m-Sugra	e^-e^+ G1	e^-e^+ G2	$\mu^-\mu^+$ G1	$\mu^-\mu^+$ G2
LM2	111.6	106	111.2	105.8
LM4	108.5	103.7	108.3	103.4
LM5	112.1	108.1	112.1	108.4
LM6	113.1	110	113.4	110
LM8	113.9	106.5	113.4	106.3

Cuadro 3.2: Valores promedio de la masa de los pares e^-e^+ y $\mu^-\mu^+$ para los diferentes valores de parámetros mSugra y los dos grupos en que se ha dividido el canal.

Design Report.³ La grafica 3.7 muestra la masa para el par e^-e^+ y $\mu^-\mu^+$ hecho con el parámetro LM4 en este reporte.

La separación angular de cada par e^-e^+ y $\mu^-\mu^+$ tanto del grupo 1 como del grupo 2 para los diferentes parámetros mSugra se muestran en las figuras 3.8 y 3.9, en la figura 3.10 aparece el ángulo $\Delta\phi$ ente los dos leptones que reconstruyen la masa del Z^0 para el parámetro mSugra LM4 obtenido en el artículo *CMS Physics Technical Design Report*,⁴.

La separación angular entre cada par de leptones (e^-e^+ y $\mu^-\mu^+$) para los grupos 1 y

³CMS Physics Technical Design Report, Volume II: Physics Performance, CERN/LHC 2006-021, p434.

⁴CMS Physics Technical Design Report, Volume II: Physics Performance, CERN/LHC 2006-021, p434.

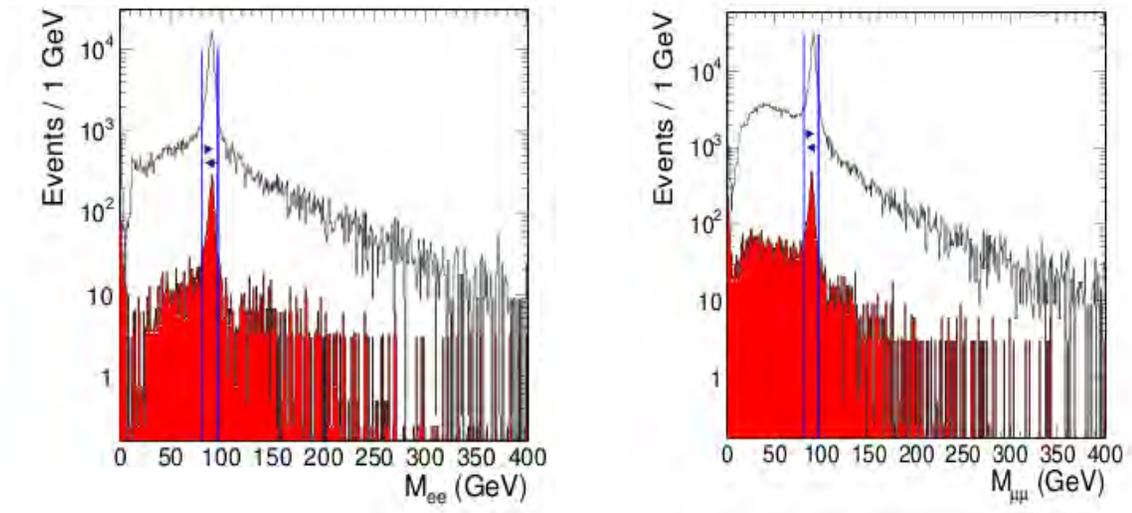


Figura 3.7: Masas reconstruidas para el par e^-e^+ (Izquierda) y $\mu^-\mu^+$ (Derecha), las líneas verticales denotan los requerimientos de masa impuestos. Tomado: CMS Physics Technical Design Report, Volume II: Physics Performance, CERN/LHC 2006-021, p 434.

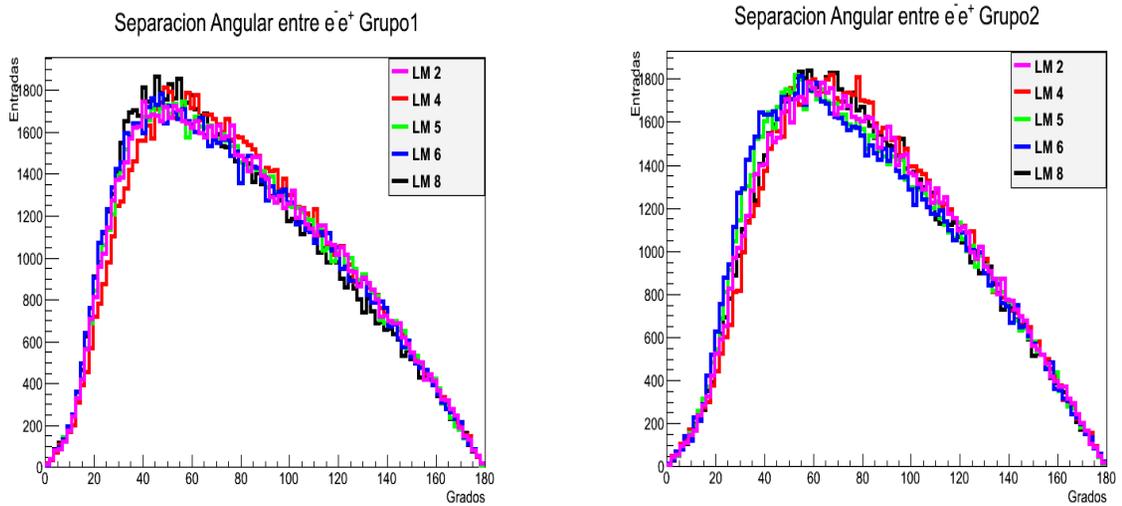


Figura 3.8: Separación Angular entre el par e^-e^+ del grupo 1 (Izquierda) y del grupo 2 (Derecha) para los parámetros $mSugra$ LM2, LM4, LM5, LM6 y LM8. Fuente de esta investigación.

2 no muestran una significativa diferencia para los diferentes parámetros, los valores muestran una mayor producción entre los ángulos 25 - 80 grados que corresponden a un rango entre 0.5 - 1.4 radianes y una gran similitud al al figura 3.10 que hace el requerimiento para este ángulo de separación entre los dos leptones en estado final sea menor de 2.65 rad. En el cuadro 3.3 aparecen los valores promedio para estas

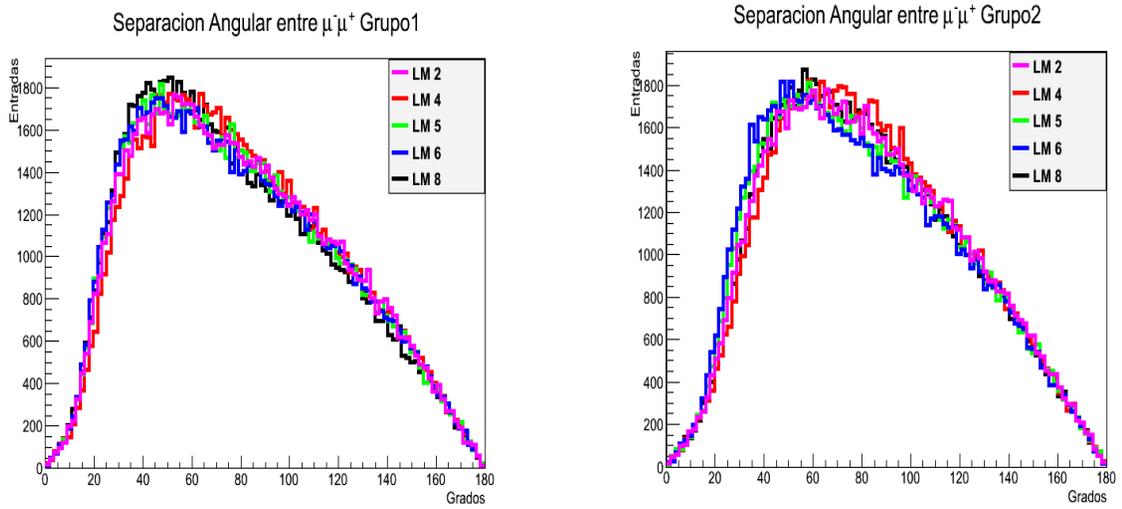


Figura 3.9: Separación Angular entre el par $\mu^- \mu^+$ del grupo 1 (Izquierda) y del grupo 2 (Derecha) para los parámetros mSugra LM2, LM4, LM5, LM6 y LM8. Fuente de esta investigación.

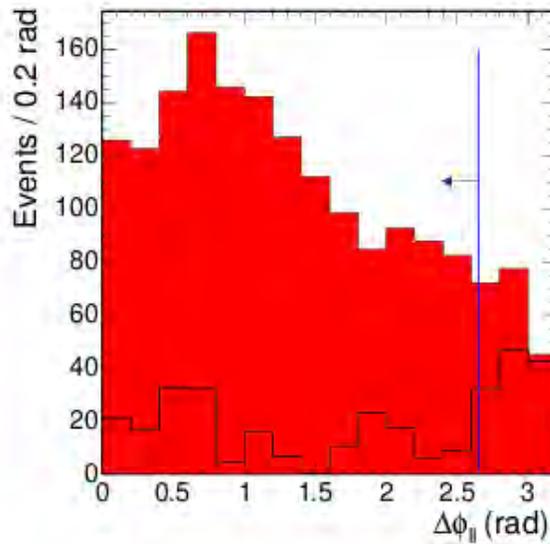


Figura 3.10: Angulo $\Delta\phi$ entre los dos leptones para el background (línea negra) y para la señal (roja). La línea vertical indica los requerimientos para $\Delta\phi$ entre el par de leptones. Tomado: CMS Physics Technical Design Report, Volume II: Physics Performance, CERN/LHC 2006-021, p 434.

separaciones angulares de par de leptones en los grupos 1 y 2 para los cinco parámetros mSugra.

P. m-Sugra	e^-e^+ G1	e^-e^+ G2	$\mu^-\mu^+$ G1	$\mu^-\mu^+$ G2
LM2	79.96	83.5	80.1	83.4
LM4	80.92	84.1	80.82	83.93
LM5	79.66	81.82	79.27	81.97
LM6	78.98	81.37	79.23	80.98
LM8	77.85	82.69	77.92	82.69

Cuadro 3.3: Valores promedio de la separación angular del par e^-e^+ y el par $\mu^-\mu^+$ para los diferentes valores de parámetros mSugra y los dos grupos en que se ha dividido el canal.

3.2. Búsqueda de Energía transversal Faltante E_T^{Miss}

En la física de partículas experimental la E_T^{Miss} juega un papel muy importante ya que revela la presencia de partículas que interactúan débilmente con la materia y escapan a la detección en los aceleradores de partículas.

Dentro del Modelo Estándar (ME), la única partícula que escapa a la detección es el neutrino, en los modelos SUSY que conservan la paridad R, la presencia de partículas LSP son las que contribuyen con la E_T^{Miss} , lo que convierte a ésta en una muy importante observable en estudios que se trabajan con modelos supersimétricos.

La energía transversal faltante, E_T^{Miss} es reconstruida de la suma vectorial de las energías transversas de todas las celdas en el calorímetro, el vector total de momento visible es denotado por el vector energía faltante; así que la E_T^{Miss} es la magnitud negativa de la suma vectorial de las energías transversales en las torres calorimétricas y se define como ⁵ se indicó en la ecuación 2.3.1 del capítulo anterior.

Los resultados de la simulación para los parámetros mSugra LM2, LM4, LM5, LM6 y LM8 son mostrados en la figura 3.11 y en la figura 3.12 la gráfica de la E_T^{miss} para el análisis echo en el artículo *CMS Physics Technical Design Report* ⁶

En el cuadro 3.4 se encuentran los valores de la Energía Transversal Faltante para los parámetros mSugra.

⁵Lina Huertas Guativa, Producción de S-quarks y Gluinos en el Experimento CMS, Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Programa de Física, San Juan de Pasto, pag 41

⁶CMS Physics Technical Design Report, Volume II: Physics Performance, CERN/LHC 2006-021, p434.

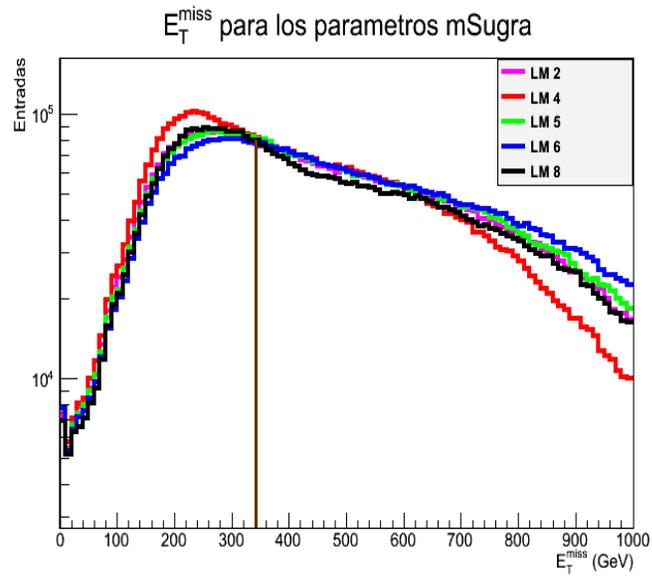


Figura 3.11: *Energía Transversal Faltante para los Parámetros LM2, LM4, LM5, LM6 y LM8. Fuente de esta investigación.*

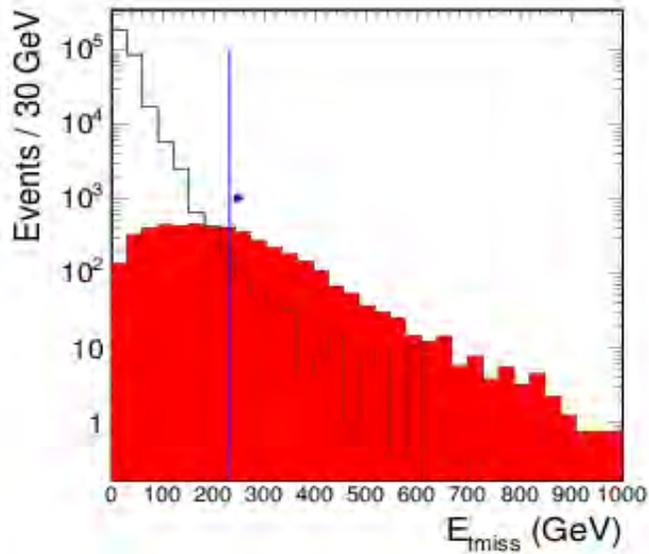


Figura 3.12: *Energía Transversal Faltante para el análisis hecho en el artículo CMS Physics Technical Design Report. Tomado: CMS Physics Technical Design Report, Volume II: Physics Performance, CERN/LHC 2006-021, p 434.*

P. m-Sugra	E_T^{miss}
LM2	173
LM4	162.4
LM5	175.8
LM6	181.7
LM8	173.6

Cuadro 3.4: Valores de Energía Transversal Faltante promedio para los parámetros mSugra LM2, LM4, LM5, LM6 y LM8.

3.3. Búsqueda de Jets

Como se indica en el cuadro 2.2 de la sección 2.3.2, los eventos con gran cantidad de energía transversal faltante y las partículas de gran momento transversal son los principales caminos para la búsqueda de señales SUSY, por tal razón los jets de alto momento transversal son tan importantes en el desarrollo de este trabajo, para esto se hace una medida del momento transversal (P_T) de cada uno de los jets que aparecen en el canal elegido, que para el grupo 1 es un jet que proviene del decaimiento de un squark, $\tilde{q} \rightarrow q\chi_2^0$, y para el grupo 2 son 2 jets, el primero proviene del decaimiento de gluino $\tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}$ y el segundo jet del decaimiento del squark que se produjo en este decaimiento $\tilde{q} \rightarrow q\chi_2^0$.

En la figura 3.13 se muestran los resultados encontrados para el momento transversal del jet del grupo 1 y en la figura 3.14 el momento trasverso de los dos jet del grupo 2 para los diferentes parámetros mSugra.

Los Jets que provienen del decaimiento de un Squark son los que aparecen con un mayor momento transversal, el del grupo 1 con el momento mas grande, $P_T \approx 290$ GeV y los del grupo 2 con momentos $P_T \approx 90$ GeV y $P_T \approx 260$ GeV respectivamente.

En el cuadro 3.5 aparecen los valores promedio de cada uno de los Jets para los cinco parámetros mSugra.

Los resultados de variación de los parámetros mSugra realizados en este trabajo son semejantes a los mostrados en el trabajo de grado Producción de S-quarks y Gluinos en el

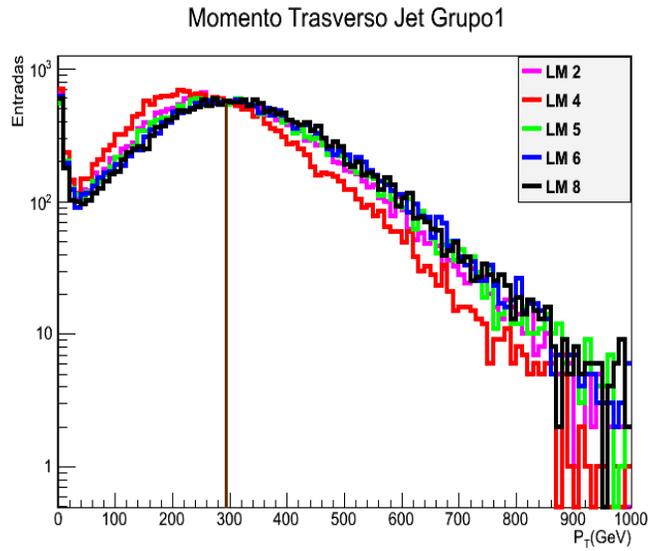


Figura 3.13: Momento Transverso del Jet del Grupo 1 para los Parámetro mSugra LM,2 LM4, LM5, LM6 y LM8. Fuente de esta investigación.

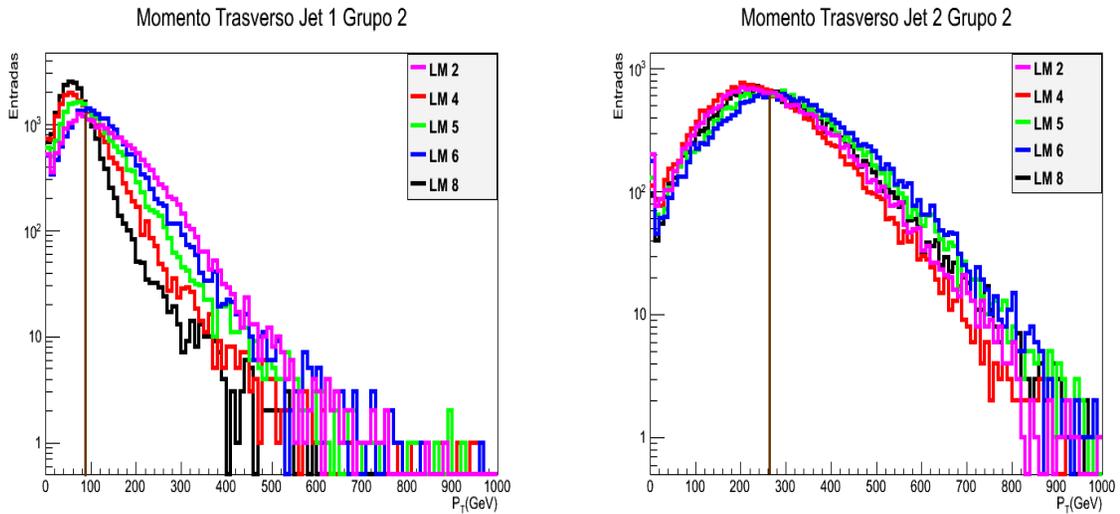


Figura 3.14: Momento Transverso Jets del Grupo 2, Jet que proviene del decaimiento del Gluino, $\tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}$, (Izquierda), Jet que proviene del decaimiento del Squark, $\tilde{q} \rightarrow q\chi_2^0$, (Derecha), para los Parámetros mSugra LM2, Lm4, LM5, LM6 y LM8. Fuente de esta investigación.

Experimento CMS, Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Programa de Física, realizado por la estudiante Lina Huertas Guativa en el año 2009, en este trabajo se hizo la simulación del mismo canal con el parámetro mSugra LM2 y con las condiciones de la colisión protón-protón a energía centro de masa de 14 Tev en

P. m-Sugra	P_T Jet G1	P_T Jet1 G2	P_T Jet2 G2
LM2	297.8	134.7	266.8
LM4	264.7	86.27	253.3
LM5	310.6	105.8	295.8
LM6	320.5	126.2	309.2
LM8	322.9	71.98	280.8

Cuadro 3.5: Valores promedio momento transverso para los parámetros mSugra LM2, LM4, LM5, LM6 y LM8.

el marco del experimento CMS del LHC.

4 CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos se puede concluir que la Energía transversal faltante es una variable sumamente importante a la hora de hacer búsquedas SUSY. Esto debido a que la gran cantidad de energía transversal faltante más allá de 100 GeV no se logra explicar por procesos del Modelo Estándar. Como vemos en los resultados esta variable es evidencia directa de física SUSY independientemente de los parámetros mSugra ya que el valor para cada parámetro está por encima de los 100 GeV y muestran un punto en común todos los parámetros con los que se hizo el análisis en 340 GeV aproximadamente.

En el momento transversal de los jets se nota una dependencia mayor de los parámetros mSugra como se puede evidenciar en los histogramas en donde se observa claramente la diferencia de parámetros, Aquí también se puede concluir que los jets que provienen del decaimiento de los Squarks serán los que tienen mayor momento transversal que el que proviene del decaimiento del Gluino.

La masa y separación angular del par de leptones en el estado final no representan ninguna variable que por sí sola pueda dar evidencia de física más allá del Modelo Estándar, tampoco se puede evidenciar alguna diferencia.

BIBLIOGRAFÍA

Alberto Ocampo Rios. *Search for squarks and gluinos in events with muons, jets and missing transverse energy in pp collisions using the cms detector*. Ph.D. Thesis Proposal., 2008. Universidad de los Andes, Bogotá. Departamento de Física.

A.L.C. MORA, *BÚSQUEDA DE SQUARKS CON ESTADOS FINALES DE DIMUONES DE SIGNO OPUESTO, JES Y ENERGÍA TRANSVERSA FALTANTE A $\sqrt{s} = 7$ TEV EN EL EXPERIMENTO CMS*, Tesis de maestría, Universidad de los Andes, 2010.

arXiv:1106.5048v1 *Missing transverse energy performance of the CMS detector*. 24 Jun 2011

A. V. Gladyshev and D. I. Kazakov. *Supersymmetry and LHC. Physics of Atomic Nuclei*. 70:1553-1567, September 2007. *CMS Physics Technical Design Report, Volume II: Physics Performance*, CERN/LHC 2006-021

H.E. Haber, G.L. Kane. *The Search For Supersymmetry: Proving Physics Beyond The Standard Model* Ed. North-Holland - Amsterdam, 1984.

J.E. Barradas Guevara, M. Gómez, *Decaimientos de sneutrinos*, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, REVISTA MEXICANA DE FÍSICA, 2002.

J. L. Feng, J.-F. Grivaz, and J. Nachtman. *Searches for supersymmetry at high-energy colliders*. *Reviews of Modern Physics*, 82:699-727, January 2010.

Lina Huertas Guativa, *Producción de S-quarks y Gluinos en el Experimento CMS*, Uni-

versidad de Nariño, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Programa de Física, San Juan de Pasto, 2009.

Martin Florian Niegel. *Search for Supersymmetry in Trimuon Final States with the CMS Detector*. PhD thesis, Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), 2009.

MORII, T., LIM, C.S., MUKHERJEE, S.N., *The Physics of the Standard Model and Beyond*, 2004.

Richard Genik. *The Search for Di-Lepton Signatures from Squarks and Gluinos in pp -bar collisions at $\sqrt{s}=1.8$ TeV*. PhD thesis, Michigan State University. Department of Physics and Astronomy., 1998.

ROOT-*An Object Oriented Data Analysis Framework*, Users Guide 5.20, 2008

T. Sjöstrand, S. Mrenna, and P. Skands. *PYTHIA 6.4 physics and manual*. Journal of High Energy Physics, 5:26?+, May 2006.

Yu. M. Andreev, S. I. Bityukov, N. V. Krasnikov, and A.Ñ. Toropin. *Using the $e+\mu-+ + E(T)(miss)$ signature in the search for supersymmetry and lepton flavour violation in neutralino decays*. Phys. Atom. Nucl., 70:1717?1724, 2007.

DESCRIPCIÓN DEL CANAL DE ESTUDIO EN EL PROGRAMA DE SIMULACIÓN PYTHIA 6 Y CÓDIGOS USADOS PARA LA SIMULACIÓN.

Pythia es un generador de eventos de física de partículas, como tal permite la reconstrucción de diversos tipos de análisis que se dan en un estudio de física de partículas, tales como decaimientos, producción de resonancia, haces de leptones, procesos de mezcla, resonancia de decaimientos, procesos no perturbativos, interacción hadron-hadron.

Para hacer uso de la plataforma de Pythia, tres fases son importantes para realizar una corrida. En la primera fase, la inicialización, el carácter general de la corrida es determinado. Esto requiere la especificación de las incoming hadrones y las energías involucradas. También es posible seleccionar específicos estados finales, y hacer un número de decisiones sobre detalles en la generación subsecuente. Este paso es finalizado por un PYINIT, en el cual varias variables son iniciadas de acuerdo con los valores colocados. La segunda fase consiste en el loop principal sobre el número de eventos. Este evento puede ser analizado, usando información almacenada en algunos common blocks. En la fase final, los resultados son presentados.

Aquí se va a dar una descripción detallada del procedimiento seguido para el desarrollo de este trabajo y adicionalmente algunas características y subprocesos para otro tipo de análisis que se puede realizar usando Pythia 6.

Existen una serie de interruptores que deben de ser activados para dar la especificación del proceso que se desea trabajar, el primero de ellos es MSEL, este selecciona entre un uso total y algunas alternativas pre-programadas. En la opción 0, la designación de subprocesos debe ser encendida por el usuario en otros interruptores, pero existen algunas opciones tales como 4 donde el trabajo es exclusivo para la producción de quarks charm ($c\bar{c}$) y otra gran variedad como producción de $Z^0 + \text{Jets}$ (MSEL = 13), producción de par sleptones (MSEL = 42), existe un total de 35 alternativas que se pueden escoger. Una vez seleccionado el proceso se da una especificación de este con una serie de interruptores y parámetros que contienen el código de estatus y parámetros que regulan la performance del programa, se conocen como PYPARMS y entre ellos están MSTP, PARP, MSTI y PARI.

MSTP selecciona el tipo de interacción, existe una variada gama en donde dependiendo del proceso dado en PYINIT (ver mas adelante) se pueden activar, desactivar o especi-

ficar, por ejemplo, con MSTP(48) que es exclusivo para el tratamiento de decaimientos γ^*/Z^0 para procesos de eventos e^+e^- . En el desarrollo de este trabajo se usa las opciones MSEL(61) que es el interruptor para QCD y radiación QED en el estado inicial, con 1 se enciende el proceso QCD en eventos hadronicos y QED en eventos leptonicos, MSTP(71) interruptor para QCD y radiación QED en estado final, igual que MSTP(61) es encendido con la opción 1, MSTP(81) múltiples interacciones, MSTP(82) estructura de múltiples interacciones para procesos QCD, la opción 3 se asume un parámetro de impacto variable y materia hadronica, MSTP(111) interruptor para la fragmentación y decaimiento, PARP(82) Regula la escala $p_{\perp 0}$ del espectro de momento transverso para múltiples interacciones con MSTP(82) ≥ 2

Los parámetros disponibles para el escenario SUSY se almacenan en el common block PYMSSM. En general, las opciones son establecidas por IMSS, mientras que los parámetros con valores reales son fijados por RMSS. Para dar acceso a los parámetros que permiten la simulación del MSSM se tiene IMSS, con la opción 1 se activa todos los niveles de simulación MSSM que tiene otras subopciones, aquí se trabaja con 2 que simula una aproximación SUGRA, reduce el número de parámetros libres. en este caso, solamente cinco entradas de parámetros son usados. RMSS(1) es la masa común del gaugino $m_{1/2}$, RMSS(8) es la masa común escalar m_0 RMSS(4) fija el signo del higgsino μ , RMSS(16) acoplamiento trilineal A , y RMSS(5) es $\tan \beta$

Cuando un evento es generado, parte de la información es relevante para algunos subprocesos, para esto se usa los PYPARMS MSTP, PARP, MSTI, PARI los cuales proporcionan información sobre los últimos eventos generados o, en algunos casos, en las estadísticas acumuladas durante la corrida. MSTI especifica el tipo general de subproceso que ha ocurrido de acuerdo con el código ISUB dado, se puede encontrar todos los subprocesos con su respectivo código ISUB en las tablas 16-25 del manual de Pythia ¹, los procesos ISUB que trabajan todo lo respectivo a producción de partículas SUSY están en las tablas 21 y 22, el desarrollo de este trabajo esta centrado en la producción exclusiva de un squark y un gluino y sus códigos son ISUB(258) y ISUB(259).

Los procesos de fragmentación y decaimiento se clasifican de acuerdo con el tipo de producción (mesón, barión) y existe una cadena de fragmentación bastante complicada para un estado multipartonico genérico. El common block PYDAT1 contiene los prin-

¹T.Sjostrand, S. Mrenna, and P. Skands. PYTHIA 6.4 physics and manual. Journal of High Energy Physics, 5:26?+, May 2006. pag 121-130

cipales interruptores y parámetros para el tratamiento de fragmentación y decaimiento y también para algunos otros aspectos. Aquí uno puede controlar en detalle que el programa sea ejecutado si las operaciones por defecto no son satisfactorias. Aquí MSTU y PARU se relacionan con las funciones de utilidad, mientras que MSTJ y PARJ afectan las hipótesis físicas subyacentes. MSTJ(1) escoge la fragmentación Scheme, con 1 cadena de fragmentación de acuerdo con el modelo de Lund. MSTJ(11) escoge la función de fragmentación longitudinal, es decir, como una gran fracción de la energía de un hadrón recién creado es tomada, con la opción 3 se eligen los parámetros de Peterson por separado para charm, bottom y top. MSTJ(22) corte en longitud de decaimiento de una partícula que es permitido a decaer de acuerdo con MSTJ(21) y el valor de MDCY, con la opción decaen las partículas inestables.

Hasta aquí se ha dado la primera parte donde se describe en detalle el tratamiento que se le va a dar al canal de análisis, pero aun no se tiene la descripción exacta del canal, es aquí donde se especifica el canal a trabajar, en este trabajo es la colisión protón-protón que decaen en un squark y un gluino, la primera parte de colisión protón-protón se da en PYINT (FRAME, BEAM, TARGET, WIN)

FRAME: una variable característica usada para especificar el marco del experimento, en este caso es usado el CMS, colisiona dos haces uno con momentum en la dirección $+z$ y la otra con momentum en la dirección $-z$. Existen variables en donde se puede colisionar un haz de partículas con momentum en la dirección $+z$ y un blanco fijo (FIXT) y otras en donde se especifican libremente el momentum de haz incidente, el momentum del blanco y las masas y energías (3MOM, 4MOM, ...)

BEAM, TARGET: Variable características para especificar los haces de partículas que colisionan, para este trabajo protón-protón ("p", "p").

WIN: Introduce la energía del sistema, depende del FRAME usado, FRAME = CMS: energía total del sistema (en GeV), aquí se trabaja con 7 Tev (7000 Gev).

La segunda parte donde se especifican los decaimientos del squark y del gluino se da mediante el interruptor MDME con su respectivo código kf de la partícula, este código se lo encuentra en PYDATA(12) junto con todas las formas de decaimiento de cada partícula, así se lleva a una partícula a todas sus formas de decaimiento y se elige uno en particular empezando el ciclo nuevamente con las nuevas partículas producidas hasta llegar a formar canal de estudio, para este trabajo el canal escogido se muestra en la

figura 2.1

El código completo que describe el canal de estudio y saca los histogramas para determinar la energía y la velocidad del centro de masa partónico se da a continuación:

```
//===== \\
//  Librerias      \\
//===== \\
# ifndef __CINT__
# include <stdlib.h>
# include <ostream.h>
# include <TRoot.h>
# include <TPrint.h>
# include <TApplication.h>
# include <TFile.h>
# include <TMCParticle.h>
# include <TObjArray.h>
# include <TPythia6.h>
# include <TTree.h>
# include <TClonesArray.h>
# include <TH2.h>
# include <TStyle.h>
# include <TCanvas.h>
# include "Riostream.h"
# include "TNetFile.h"
# include "TRandom.h"
# include "TBranch.h"
# include "TStopwatch.h"
# endif

void loadLibraries()
{
#ifdef __CINT__
  gSystem->Load("libEG");
  gSystem->Load("usr/local/lib/root/libPythia6"); //change to your setup
  gSystem->Load("usr/local/lib/root/libEGPythia6");
#endif
}

struct pythia_particle {
  Int_t status;          // status of particle          ( LUJETS K[1] )
  Int_t pdg_id;         // flavour code          ( LUJETS K[2] )
  Int_t parent;         // parrent's id          ( LUJETS K[3] )
  Int_t firstChild;    // id of first child     ( LUJETS K[4] )
  Int_t lastChild;     // id of last child     ( LUJETS K[5] )
  Float_t momentum[4]; // X,Y,Z,energy momenta [GeV/c] ( LUJETS P[1]=P[4] )
  Float_t mass;        // Mass [Gev/c^2]        ( LUJETS P[5] )
  Float_t vertex[4];   // X,Y,Z vertex [mm]; time of production [mm/c] ( LUJETS V[1]-V[4] )
  Float_t lifetime;   // proper lifetime [mm/c] ( LUJETS V[5] )
};

int P2ATest(int nEvent=5, int compress=1);

//-----

int P2ATest(int nEvent, int compress)
{
  // LoadPythia();
  TStopwatch fulltime;
  Int_t i;
  Int_t NEvents;

```

```

Int_t startdecay;
Int_t enddecay;
NEvents      = nEvent;

//=====
//                               Histogramas de Energía y Velocidad CMP
//=====

TPythia6 Pythia;
TFile* file1 = new TFile("EVL2.root","RECREATE","EVL2.root", compress);
TH1F *ELM2 = new TH1F("ELM2","Energia CM Partonico para LM2",100,0,7);
TH1F *VLM2 = new TH1F("VLM2","Velocidad CM Partonico LM2", 100, 0, 1 );

//=====
//                               Generar el COMMON BLOCK para la produccion de un squark - gluino
//                               Permite que corra el programa con algun subconjunto de procesos designados o
//                               restricciones cinematicas o de sabores.
//=====

Pythia.SetMSEL(0);          //Subprocesos designados tienen que estar encendidos en MSUB
                             (formacion que se produce), se tiene control total por el
                             usuario

Pythia.SetMSUB(258,1);      // f_ig -> ~q_iL~g
Pythia.SetMSUB(259,1);      // f_ig -> ~q_iR~g
Pythia.SetMSUB(294,1);      // bg --> ~b_1 ~g
Pythia.SetMSUB(295,1);      // bg --> ~b_2 ~g
Pythia.SetMSTP(61, 1);      // ISR "Encendido"
Pythia.SetMSTP(71, 1);      // FSR "Encendido"
Pythia.SetMSTP(81,0);       // seleccionando multiples interacciones
Pythia.SetMSTP(111,1);     // fragmentacion Encendida
Pythia.SetMSTP(82, 3);      // multiple interaction "vary impact param"
Pythia.SetPARP(82, 2.41);   // cut-off pt for multiple interaction
Pythia.SetMRPY(1, 88158204); // random seed number

//=====
//                               Esenario para la simulación en el esenario m-Sugra
//=====

Pythia.SetIMSS(1,1);        // Simulacion general en MSSM
Pythia.SetIMSS(1,2);        // aproximacion SUGRA
Pythia.SetIMSS(9,1);        //
Pythia.SetMSTJ(11, 3);      // select fragmentation function "Bowler"
Pythia.SetMSTJ(22, 2);      // decay those unstable particles
Pythia.SetMSTJ(1, 1);       // parton hadronization and production of final state particles
Pythia.SetPARJ(50+4, -0.07); // peterson parameter for charm
Pythia.SetPARJ(50+5, -0.006); // peterson parameter for bottom
Pythia.SetPARJ(50+5, -0.000001); // peterson parameter for top

//=====
//                               Parametros m-Sugra
//=====

Pythia.SetRMSS(8,185);      // masa escalar m0 (squark)
Pythia.SetRMSS(1,350);      // m1/2 masa gaugino
Pythia.SetRMSS(5,35);       // tanbeta (chargino y neutralino)
Pythia.SetRMSS(4,100);      // mu
Pythia.SetRMSS(16,0);       // A0 coupling

//=====
//                               PYINIT Descripcion del canal
//=====

for (int i=1; i<4352; i++) { // 1-4352 Todos los posibles decaimientos
  Pythia.SetMDME(i,1,0);
}

```

```

    }
// Todos los posibles decaimientos de Gluino  $\tilde{g}$  (1975-2161)

    for (int i=1975; i<2162; i++) {
        Pythia.SetMDME(i,1,0);
    }
// Decaimiento del  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{q} + q$ 

    Pythia.SetMDME(1976,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{d}_L + dbar$ 
    Pythia.SetMDME(1977,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{d}_{Lbar} + d$ 
    Pythia.SetMDME(1978,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{d}_R + dbar$ 
    Pythia.SetMDME(1979,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{d}_{Rbar} + d$ 
    Pythia.SetMDME(1980,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{u}_L + ubar$ 
    Pythia.SetMDME(1981,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{u}_{Lbar} + u$ 
    Pythia.SetMDME(1982,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{u}_R + ubar$ 
    Pythia.SetMDME(1983,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{u}_{Rbar} + u$ 
    Pythia.SetMDME(1984,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{s}_L + sbar$ 
    Pythia.SetMDME(1985,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{s}_{Lbar} + s$ 
    Pythia.SetMDME(1986,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{s}_R + sbar$ 
    Pythia.SetMDME(1987,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{s}_{Rbar} + s$ 
    Pythia.SetMDME(1988,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{c}_L + cbar$ 
    Pythia.SetMDME(1989,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{c}_{Lbar} + c$ 
    Pythia.SetMDME(1990,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{c}_R + cbar$ 
    Pythia.SetMDME(1991,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{c}_{Rbar} + c$ 
    Pythia.SetMDME(1992,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{b}_1 + bbar$ 
    Pythia.SetMDME(1993,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{b}_{1bar} + b$ 
    Pythia.SetMDME(1994,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{b}_2 + bbar$ 
    Pythia.SetMDME(1995,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{b}_{2bar} + b$ 
    Pythia.SetMDME(1996,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{t}_1 + tbar$ 
    Pythia.SetMDME(1997,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{t}_{1bar} + t$ 
    Pythia.SetMDME(1998,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{t}_2 + tbar$ 
    Pythia.SetMDME(1999,1,1); //  $\tilde{g} \rightarrow \tilde{t}_{2bar} + t$ 

// Todos los decaimientos de  $\tilde{q}_L$  y  $\tilde{q}_{Lbar}$ 

    for (int i=1592; i<1802; i++) {
        Pythia.SetMDME(i,1,0);
    }

// Escojemos solo los que decaen en  $\tilde{\chi}_{20} + q$ 

    Pythia.SetMDME(1596,1,1); //  $\tilde{d}_L \rightarrow \tilde{\chi}_{20} + d$ 
    Pythia.SetMDME(1641,1,1); //  $\tilde{u}_L \rightarrow \tilde{\chi}_{20} + u$ 
    Pythia.SetMDME(1665,1,1); //  $\tilde{s}_L \rightarrow \tilde{\chi}_{20} + s$ 
    Pythia.SetMDME(1710,1,1); //  $\tilde{c}_L \rightarrow \tilde{\chi}_{20} + c$ 
    Pythia.SetMDME(1734,1,1); //  $\tilde{b}_1 \rightarrow \tilde{\chi}_{20} + b$ 
    Pythia.SetMDME(1779,1,1); //  $\tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{\chi}_{20} + t$ 

// Todos los decaimientos de  $\tilde{q}_R$  y  $\tilde{q}_{Rbar}$ 

    for (int i=3657; i<3888; i++) {
        Pythia.SetMDME(i,1,0);
    }

//Escojemos solo los que decaen en  $\tilde{\chi}_{20} + q$ 

    Pythia.SetMDME(3661,1,1); //  $\tilde{d}_R \rightarrow \tilde{\chi}_{20} + d$ 
    Pythia.SetMDME(3710,1,1); //  $\tilde{u}_R \rightarrow \tilde{\chi}_{20} + u$ 
    Pythia.SetMDME(3738,1,1); //  $\tilde{s}_R \rightarrow \tilde{\chi}_{20} + s$ 
    Pythia.SetMDME(3787,1,1); //  $\tilde{c}_R \rightarrow \tilde{\chi}_{20} + c$ 
    Pythia.SetMDME(3815,1,1); //  $\tilde{b}_2 \rightarrow \tilde{\chi}_{20} + b$ 
    Pythia.SetMDME(3787,1,1); //  $\tilde{t}_2 \rightarrow \tilde{\chi}_{20} + t$ 

// Todos los posibles decaimientos del  $\tilde{\chi}_{20}$ 

```

```

    for (int i=2331; i<2594; i++) {
        Pythia.SetMDME(i,1,0);
    }

// Decaimiento en  $\tilde{\chi}_{10} + Z$ 
    Pythia.SetMDME(2337,1,1); //  $\tilde{\chi}_{20} \rightarrow \tilde{\chi}_{10} + Z_0$ 

// Todos los decaimientos del Z

    for (int i=174; i<190; i++) {
        Pythia.SetMDME(i,1,0);
    }

// Decaimientos del Z en un par Muon-Antimuon

    Pythia.SetMDME(184,1,1); // Z  $\rightarrow \mu^- + \mu^+$ 

// Estabilizar las particulas en su estado final

    Pythia.SetMDCY(13,1,0); // Estabilidad de  $\mu^-$  y  $\mu^+$ 
    Pythia.SetMDCY(310,1,0); // Estabilidad de  $\tilde{\chi}_{10}$ 

//=====
//                               PYINIT Call
//       Variable caracteristica usada para especificar el marco del experimento
//=====

    Pythia.Initialize("CMS", "p", "p", 7000.0); // Colision p p a energia de 7000 Gev
                                                // en el experimento cms de LHC.

//=====
//                               Creacion de eventos en ROOT
//=====

    TClonesArray* part=(TClonesArray*)Pythia.GetListOfParticles();
    TStopwatch ioTime;
    ioTime.Stop();

//=====Generador de Eventos=====

//Definicion de variables

    Double_t P,E,M,e,E1,E2,m1,m2,px1,px2,py1,py2,pz1,pz2,p1,p2,cos12,masa1,masa2,ang,angt,
    etaq,etag,thetaq,thetag,phiq,phig;
    Double_t pi = 4*atan(1.0);
    Double_t Ecm;
    Double_t Vcm;
    int Si = 0;
    int No = 0;

// loop de evetos

    for ( i=0; i<NEvents; i++ ) {
        if ( i%1 == 0 ) cout << "Event No.: " << i << endl;
        Pythia.GenerateEvent();
        for (Int_t nparti=1; nparti<=Pythia.GetN(); nparti++) {

//Estados Finales

            if (Pythia.GetK(npart,2) !=1000001 && Pythia.GetK(npart,2) !=-1000001 &&
                Pythia.GetK(npart,2) !=1000002 && Pythia.GetK(npart,2) !=-1000002 &&
                Pythia.GetK(npart,2) !=1000003 && Pythia.GetK(npart,2) !=-1000003 &&
                Pythia.GetK(npart,2) !=1000004 && Pythia.GetK(npart,2) !=-1000004 &&
                Pythia.GetK(npart,2) !=1000005 && Pythia.GetK(npart,2) !=-1000005 &&
                Pythia.GetK(npart,2) !=1000006 && Pythia.GetK(npart,2) !=-1000006 &&

```

```

Pythia.GetK(nparti,2) !=2000001 && Pythia.GetK(nparti,2) !=-2000001 &&
Pythia.GetK(nparti,2) !=2000002 && Pythia.GetK(nparti,2) !=-2000002 &&
Pythia.GetK(nparti,2) !=2000003 && Pythia.GetK(nparti,2) !=-2000003 &&
Pythia.GetK(nparti,2) !=2000004 && Pythia.GetK(nparti,2) !=-2000004 &&
Pythia.GetK(nparti,2) !=2000005 && Pythia.GetK(nparti,2) !=-2000005 &&
Pythia.GetK(nparti,2) !=2000006 && Pythia.GetK(nparti,2) !=-2000006 &&
Pythia.GetK(nparti,2) !=1000021) continue;

//Desendencia

if (Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2)!=0) continue; {

// Para todos los posibles s-quarks

if (Pythia.GetK(nparti,2) ==1000001 || Pythia.GetK(nparti,2) ==-1000001 ||
Pythia.GetK(nparti,2) ==1000002 || Pythia.GetK(nparti,2) ==-1000002 ||
Pythia.GetK(nparti,2) ==1000003 || Pythia.GetK(nparti,2) ==-1000003 ||
Pythia.GetK(nparti,2) ==1000004 || Pythia.GetK(nparti,2) ==-1000004 ||
Pythia.GetK(nparti,2) ==1000005 || Pythia.GetK(nparti,2) ==-1000005 ||
Pythia.GetK(nparti,2) ==1000006 || Pythia.GetK(nparti,2) ==-1000006 ||
Pythia.GetK(nparti,2) ==2000001 || Pythia.GetK(nparti,2) ==-2000001 ||
Pythia.GetK(nparti,2) ==2000002 || Pythia.GetK(nparti,2) ==-2000002 ||
Pythia.GetK(nparti,2) ==2000003 || Pythia.GetK(nparti,2) ==-2000003 ||
Pythia.GetK(nparti,2) ==2000004 || Pythia.GetK(nparti,2) ==-2000004 ||
Pythia.GetK(nparti,2) ==2000005 || Pythia.GetK(nparti,2) ==-2000005 ||
Pythia.GetK(nparti,2) ==2000006 || Pythia.GetK(nparti,2) ==-2000006) {

    px1      = Pythia.GetP(nparti,1);
    py1      = Pythia.GetP(nparti,2);
    pz1      = Pythia.GetP(nparti,3);
    E1       = Pythia.GetP(nparti,4);
    p1       = sqrt(px1*px1 + py1*py1 + pz1*pz1);
    Si       = 1;
}

// Para el Gluino

if (Pythia.GetK(nparti,2) == 1000021) {

    px2      = Pythia.GetP(nparti,1);
    py2      = Pythia.GetP(nparti,2);
    pz2      = Pythia.GetP(nparti,3);
    E2       = Pythia.GetP(nparti,4);
    p2       = sqrt(px2*px2 + py2*py2 + pz2*pz2);
    No       = 1;
}

}

//=====
//                               llenar Histogramas
//=====

if (Si == 1 || No == 1) { cout<<"Particula " <<Pythia.GetK(nparti,2)<<endl;
    Ecm = sqrt(((E1+E2)*(E1+E2)) + ((p1+p2)*(p1+p2)))*0.001;
    Vcm = ((p1 + p2)/(E1 + E2));
    ELM2->Fill(Ecm,1.);
    VLM2->Fill(Vcm,1.);
}

//Pythia.Pylist(1);//tabla de part producidas

// Create "MCEvent" object

ioTime.Start(kFALSE);

```

```

// Write the "whole" event into ROOT file

    int runNumber = 777;
    int eventNumber = i;

// delete this "event"

    ioTime.Stop();
    }//loop particulas

    }//loop eventos

printf(" Full time: "); fulltime.Print();
printf(" I/O time: "); ioTime.Print();
printf("nUsage: root LoadPythia.C 'P2ATest.C(nEvent)'n");
printf( "---- where nEvent - the total number of the events to generaten");
VLM2->GetXaxis()->SetTitle("C");
VLM2->GetYaxis()->SetTitle("Entradas");
VLM2->Write();
ELM2->GetXaxis()->SetTitle("E (TeV)");
ELM2->GetYaxis()->SetTitle("Entradas");
ELM2->Write();
}

```

La descripción del canal es la misma para búsqueda de las otras variables cinemáticas, la variación de parámetros mSugra se hace en la parte de RMSS” donde se deba cambiar el valor de los 5 parámetros por conjunto de valores escogido y para distinguir entre el estado final de un par $\mu^- \mu^+$ y un par $e^- e^+$ se cambia el número del código en el decaimiento del bosón Z de que aparece como 13 (código de sabor del muon) por el código 11 (código de sabor del electrón), este cambio también se debe hacer en la parte de generación de eventos para dar a conocer la partícula con la que se trabaja. La diferencia entre una partícula que pertenece al grupo 1 y al grupo 2 esta dada en la generación de eventos GetK(nparti,3) al especificar la partícula de donde se origina, con el código 0 se representa una partícula que proviene del decaimiento del Squar y con el codigo 1000021 una partícula que proviene del decaimiento del Gluino. El resto del codigo es el mismo así que en adelante unicamente sera incluido la parte de generador de eventos y los histogramas que se quieren llenar para cada caso.

Masas y separación angular del par de leptones en el estado final

```

//=====
//                               HISTOGRAMA DE masa diMuones LM2
//=====
TFile* file2 = new TFile("MAng1LM4.root","RECREATE","MAng1LM4.root", compress);
TPythia6 Pythia;

TH1F *MM1LM4 = new TH1F("MM1LM4","Masa Invariante Dimuones G1-LM4", 100, 0, 400);
TH1F *AM1LM4 = new TH1F("AM1LM4","Angulo de Separacion entre Muones G1-LM4",100,0,1800);
//=====

```

```

//
//=====

//=====Generador de Eventos=====

//Definicion de variables

Double_t E1, E2, px1, px2, py1, py2, pz1, pz2, P1, P2, mm1, anm1;
Double_t pi = 4*atan(1.0);
int mmu = 0;
int mamu = 0;
// loop de evetos
for ( i=0; i<NEvents; i++ ) { //(1)
    if ( i%1 == 0 ) cout << "Event No.: " << i << endl;
    Pythia.GenerateEvent();

// loop de particulas
for (Int_t nparti=1; nparti<=Pythia.GetN(); nparti++) { //(2)
    if (Pythia.GetK(nparti,2) != 13 && Pythia.GetK(nparti,2) != -13)continue;

// Solamente mu-
    if (Pythia.GetK(nparti,2) == 13) { //(3)
// mu- Grupo 1
if (Pythia.GetK(Pythia.GetK(Pythia.GetK(Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),3),3),3),2) != 0)continue; { //(4)
    px1 = Pythia.GetP(nparti,1);
    py1 = Pythia.GetP(nparti,2);
    pz1 = Pythia.GetP(nparti,3);
    E1 = Pythia.GetP(nparti,4);
    P1 = sqrt(px1*px1 + py1*py1 + pz1*pz1);
    mmu = 1;
    } //(4)
    } //(3)

//Solamente mu+
    if (Pythia.GetK(nparti,2) == -13) { //(5)
// mu+ Grupo 1
if (Pythia.GetK(Pythia.GetK(Pythia.GetK(Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),3),3),3),2) != 0)continue; { //(6)
    px2 = Pythia.GetP(nparti,1);
    py2 = Pythia.GetP(nparti,2);
    pz2 = Pythia.GetP(nparti,3);
    E2 = Pythia.GetP(nparti,4);
    P2 = sqrt(px2*px2 + py2*py2 + pz2*pz2);
    mamu = 1;
    } //(5)
    } //(6)

//=====
//
// Rellenar Histograma
//=====

    if (mmu == 1 || mamu == 1) { //(7)
        cout <<"Dimuon del grupo 1 " <<Pythia.GetK(nparti,2)<<endl;
        mm1 = sqrt((E1+E2)*(E1+E2) - (px1 + px2)*(px1 + px2) - (py1 + py2)*(py1 + py2) - (pz1 + pz2)*(pz1 + pz2));
        anm1 = acos((px1*px2 + py1*py2 + pz1*pz2)/(P1*P2))*180/pi;
        MM1LM4 ->Fill(mm1,1.);
        AM1LM4->Fill(anm1,1.);
    } //(7)

//tree->Fill();
//Pythia.Pylist(1);//tabla de part producidas

// Create "MCEvent" object
    ioTime.Start(kFALSE);

```

```

// Write the "whole" event into ROOT file
    int runNumber = 777;
    int eventNumber = i;

// delete this "event"
    ioTime.Stop();
} //loop particulas // (2)

} //loop eventos //(1)
printf(" Full time: "); fulltime.Print();
printf(" I/O time: "); ioTime.Print();
printf("nUsage: root LoadPythia.C 'P2ATest.C(nEvent)'n");
printf( "----- where nEvent - the total number of the events to generaten");
MM1LM4->GetXaxis()->SetTitle("M_{#mu#mu}(GeV)");
MM1LM4->GetYaxis()->SetTitle("Entradas");
MM1LM4->SetLineWidth(-802);
MM1LM4->Write();
AM1LM4->GetXaxis()->SetTitle("Grados");
AM1LM4->GetYaxis()->SetTitle("Entradas");
AM1LM4->SetLineWidth(-802);
AM1LM4->Write();
}

```

Energía Transversal Faltante E_T^{miss}

```

//=====
//                               Histograma ETmiss
//=====

TFile* file2 = new TFile("ETmissLM4.root","RECREATE","ETmissLM4.root", compress);
TPythia6 Pythia;
TH1F *ETmissLM4 = new TH1F("ETmissLM4","Energia Transversal Faltante LM4", 100, 0, 1000);

//=====
//
//=====

//=====Generador de Eventos =====

//Definición de variables

for ( i=0; i<NEvents; i++ ) {

    Double_t c = 1.;
    Double_t pi = 4*atan(1.);

    if ( i%1 == 0 ) cout << "Event No.: " << i << endl;
    Double_t E_Tmiss = 0;
    Double_t ex_Tmiss = 0;
    Double_t ey_Tmiss = 0;
    Double_t px, py, pz, E, theta, phi;
    Pythia.GenerateEvent();

    for (Int_t nparti=1; nparti<=Pythia.GetN(); nparti++)
    {
if (Pythia.GetK(npart,1) != 1)continue;
if (Pythia.GetK(npart,2) == 100022)continue;
Double_t px = Pythia.GetP(npart,1);
Double_t py = Pythia.GetP(npart,2);
Double_t pz = Pythia.GetP(npart,3);
Double_t E = Pythia.GetP(npart,4);

```

```

Double_t theta = acos(pz/(sqrt(px*px+py*py+pz*pz)));
Double_t phi = atan(py/px);
ex_Tmiss += E*sin(theta)*cos(phi);
ey_Tmiss += E*sin(theta)*sin(phi);
Etmis = sqrt(ex_Tmiss*ex_Tmiss + ey_Tmiss*ey_Tmiss);
ETmissLM4->Fill(Etmis,1.);

//Pythia.Pylist(1);//tabla de part producidas

// Create "MCEvent" object
ioTime.Start(kFALSE);

// Write the "whole" event into ROOT file
int runNumber = 777;
int eventNumber = i;

// delete this "event"
ioTime.Stop();
} //loop particulas

} //loop eventos
printf(" Full time: "); fulltime.Print();
printf(" I/O time: "); ioTime.Print();
printf("nUsage: root LoadPythia.C 'P2ATest.C(nEvent)'n");
printf( "----- where nEvent - the total number of the events to generaten");
ETmissLM4->GetXaxis()->SetTitle("E_{T}^{miss}(GeV)");
ETmissLM4->GetYaxis()->SetTitle("Entradas");
ETmissLM4->SetLineWidth(-802);
ETmissLM4->Write();

}

```

Momento Transverso para cada Jet

```

//=====
//                               HISTOGRAMA DE masa diMuones LM2
//=====
TFile* file2 = new TFile("MT1LM4.root","RECREATE","MT1LM4.root", compress);
TPythia6 Pythia;

TH1F *MT1LM4 = new TH1F("MT1LM4","Momento Transverso G1-LM4", 100, 0, 1000);

//=====
//
//=====

//=====Generador de Eventos=====

//Definicion de variables

Double_t c = 1.;
Double_t pi = 4*atan(1.);
Double_t px1, py1, pz1, phi, P1,px2, py2, pz2, P2, theta;
int aqz2 = 0;

// loop de evetos

for ( i=0; i<NEvents; i++ ) {

    if ( i%1 == 0 ) cout << "Event No.: " << i << endl;
    Pythia.GenerateEvent();

}

// loop de particulas

```

```

for (Int_t nparti=1; nparti<=Pythia.GetN(); nparti++) {

// Estados Finales

    if (Pythia.GetK(nparti,2) != 1 && Pythia.GetK(nparti,2) !=-1 &&
        Pythia.GetK(nparti,2) != 2 && Pythia.GetK(nparti,2) !=-2 &&
        Pythia.GetK(nparti,2) != 3 && Pythia.GetK(nparti,2) !=-3 &&
        Pythia.GetK(nparti,2) != 4 && Pythia.GetK(nparti,2) !=-4 &&
        Pythia.GetK(nparti,2) != 5 && Pythia.GetK(nparti,2) !=-5 &&
        Pythia.GetK(nparti,2) != 6 && Pythia.GetK(nparti,2) !=-6)continue;

// jet 1

    if (Pythia.GetK(nparti,2) == 1 || Pythia.GetK(nparti,2) == -1 ||
        Pythia.GetK(nparti,2) == 2 || Pythia.GetK(nparti,2) == -2 ||
        Pythia.GetK(nparti,2) == 3 || Pythia.GetK(nparti,2) == -3 ||
        Pythia.GetK(nparti,2) == 4 || Pythia.GetK(nparti,2) == -4 ||
        Pythia.GetK(nparti,2) == 5 || Pythia.GetK(nparti,2) == -5 ||
        Pythia.GetK(nparti,2) == 6 || Pythia.GetK(nparti,2) == -6 ) {

        if(Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != 1000001 && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != -1000001
            && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != 1000002 && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != -1000002
            && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != 1000003 && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != -1000003
            && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != 1000004 && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != -1000004
            && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != 1000005 && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != -1000005
            && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != 1000006 && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != -1000006
            && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != 2000001 && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != -2000001
            && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != 2000002 && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != -2000002
            && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != 2000003 && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != -2000003
            && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != 2000004 && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != -2000004
            && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != 2000005 && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != -2000005
            && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != 2000006 && Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),2) != -2000006)
            continue;

        if(Pythia.GetK(Pythia.GetK(Pythia.GetK(nparti,3),3),2) != 0)continue;

        px1 = Pythia.GetP(nparti,1);
        py1 = Pythia.GetP(nparti,2);
        pz1 = Pythia.GetP(nparti,3);
        theta = acos(pz1/(sqrt(px1*px1 + py1*py1 + pz1*pz1)));
        P1 = sqrt(px1*px1 + py1*py1 + pz1*pz1);
        P_T = P1*sin(theta);
        aqz2 = 1;
    }
}

//}

//=====
//                               Rellenar Histograma
//=====

    MT1LM4->Fill(P_T,1.);

//Pythia.Pylist(1);//tabla de part producidas

// Create "MCEvent" object
    ioTime.Start(kFALSE);

// Write the "whole" event into ROOT file
    int runNumber = 777;
    int eventNumber = i;

// delete this "event"
    ioTime.Stop();

```

```
    }//loop particulas // (2)

} //loop eventos //(1)
printf(" Full time: "); fulltime.Print();
printf(" I/O time: "); ioTime.Print();
printf("nUsage: root LoadPythia.C 'P2ATest.C(nEvent)'n");
printf( "----- where nEvent - the total number of the events to generaten");
MT1LM4->GetXaxis()->SetTitle("P_{T} (GeV)");
MT1LM4->GetYaxis()->SetTitle("Entradas");
MT1LM4->SetLineWidth(-802);
MT1LM4->Write();
}
```