

Alineamiento Global del Detector AFP Utilizando Eventos Exclusivos de Dos Muones

Carlos Andrés Pinzón Osorio

Universidad Antonio Nariño Maestría en Ingeniería Física Facultad de Ciencias Bogotá DC, Colombia 2021

Alineamiento Global del Detector AFP Utilizando Eventos Exclusivos de Dos Muones

Carlos Andrés Pinzón Osorio

Tesis de grado presentado como requisito para optar al título de Magíster en Ingeniería
 Física

Directora: Ph.D. Gabriela Navarro

Línea de Investigación: Física Experimental de Altas Energías

> Universidad Antonio Nariño Maestría en Ingeniería Física Facultad de Ciencias Bogotá DC, Colombia 2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado Alineamiento global del detector AFP usando eventos exclusivos de dos muones, Cumple con los requisitos para optar Al título de <u>Magíster en Ingeniería Física</u>.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Dedico especialmente este trabajo mis padres. Carlos Julio Pinzón y Marleny Osorio, sin el apoyo y amor de ellos no hubiera podido lograr este proyecto. Mi esposa Natalia cortes, mis hermanos Robinson y Arbey, por su acompañamiento en los momentos difíciles y por siempre estar cuando los necesito, y demás personas que de forma directa o indirecta participaron en la consecución de este logro.

AGRADECIMIENTOS

Especiales gracias para los profesores Gabriela Navarro y Yohany Rodriguez, por que sin su tiempo y sobre todo su paciencia no lo hubiese podido lograr. Adicionalmente agradezco a todos los demás profesores que estuvieron en toda mi formación durante mis estudios, por que ellos me dieron las herramientas para afrontar y culminar con éxitos mi maestría.

Gracias, muchísimas gracias.

Resumen

El ATLAS Forward Proton detector (AFP), es un conjunto de detectores ubicados en las proximidades del detector ATLAS, que tiene el propósito de medir la posición y energía perdida de los protones producidos a 13 TeV en procesos difractivos. Una de las tareas importantes a realizar cuando se toman datos con un detector es su calibración. En el caso de AFP, el alineamiento global de energía perdida y posición de los protones, se realiza con el fin de reducir las incertidumbres asociadas a las mediciones que se realizan en cada una de las estaciones que componen el detector. Para el presente trabajo se utilizaron datos recolectados por el detector ATLAS durante la corrida 2 del LHC 2017. Los datos se someten a filtros de alta calidad, generando listas denominadas GRLs. Luego, se seleccionan de acuerdo a criterios establecidos para el proceso en cuestión y se utilizan para realizar la alineación global de los detectores del AFP

Para dicha alineación, se utiliza la diferencia entre las posiciones de el sistema de dimuones obtenida en el detector ATLAS, y las posiciones de los protones esperados en AFP. Como resultado se obtiene una distribución cuyo pico se encuentra alrededor de cero. Esta desviación alrededor del cero se utiliza para determinar la posición global de cada estación relativa al haz de protones.

El procedimiento que se realizó en el presente trabajo, inicia desde la búsqueda de los conjuntos de datos pertenecientes a la GRL, seguido del tratamiento de ellos a través del software de selección y alineamiento, hasta finalizar con las distribuciones de las diferencias de posiciones para todas las estaciones. Estas últimas distribuciones son el resultado del alineamiento global de AFP.

Abstract

The ATLAS Forward Proton detector (AFP), is a set of detectors located next to the ATLAS detector, which has the purpose of measuring the position and fractional energy loss of protons produced at 13 TeV in diffractive processes. One of the important tasks to be performed when taking data with a detector is its calibration. In the case of AFP, the global alignment of fractional energy loss and position of the protons is performed in order to reduce the uncertainties associated with the measurements made at each of the stations.

For the present work, data colleted by the ATLAS experiment during run 2 of the LHC (2017). The data are have been process according to high quality filters, generating lists called GRLs (Good Run List). The events of the GRL data are selected according to same criteria established for the process in question and used to perform the global alignment of the AFP detectors.

For this alignment, the difference between the positions of the dimuon system measured in the central ATLAS detector and the positions of the protons expected in AFP is used. The result is a distribution whose peak is around zero. This deviation around zero is used to determine the global position of each station relative to the proton beam.

The procedure carried out in the present work starts with the search of the data sets belonging to the GRL, followed by their treatment through the selection and alignment software, and ends with the distributions of the position differences for all the stations. These last distributions are the result of the global alignment of AFP.

Keywords – ATLAS Forward Proton (AFP), alignment, Fractional energy loss, ATLAS

Índice general

A	GRA	DECI	MIENTOS	Π
Re	esum	en		III
Al	ostra	\mathbf{ct}		IV
1.	Intr	oducci	ión	1
2.	Mar	co Teć	órico	3
	2.1.	Model	o Estándar	3
			2.1.0.1. Física Difractiva	5
			2.1.0.2. Producción Exclusiva Central	8
	2.2.	Experi	imentos de física de altas energías	9
	2.3.	Gran (Colisionador de Hadrones	10
	2.4.	ATLA	S	12
		2.4.1.	Detector Interno	14
		2.4.2.	Calorímetros	16
		2.4.3.	Espectrómetro de Muones	18
		2.4.4.	Trigger	19
	2.5.	Detect	or AFP	20
		2.5.1.	Disposición de AFP	21
		2.5.2.	Roman Pot	22
		2.5.3.	Silicon Tracker Detector	23
		2.5.4.	Time of Flight Detector	24
3.	Alin	eamie	nto Global	25
	3.1.	Alinea	miento	25
		3.1.1.	Reconstrucción del Protón	26
		3.1.2.	Selección de Eventos	27
		3.1.3.	Método de alineamiento	28
		3.1.4.	Conjunto de Datos Procesados	29
		3.1.5.	Proceso de Selección dimuones y Alineamiento Global	31
4.	Aná	lisis		33
	4.1.	Señal	y Background	33
	4.2.	Restrie	cciones Aplicadas sobre $\xi_{AFP} - \xi_{\mu\mu}$	35
	4.3.	Ajuste	e Gaussiano	39

5. Conclusiones	43
Referencias	45
Apéndices	48

Índice de tablas

2.1.1. Propiedades y organización de las partículas del modelo estándar (SM)	4
2.3.1.Parámetros del haz en LHC (1)	12
 3.1.1.Selección de eventos exclusiva central	28 30 31 32
4.2.1.Disminución de eventos con relación a las restricciones aplicadas.	38

Índice de figuras

2.1.1.Diagramas de Feynman de procesos soft en colisiones hadrónicas: (a)	
interacción no difractiva, (b) dispersión elástica, (c) disociación difractiva	
simple, (d) disociación difractiva doble (2)	7
2.1.2. Tipos de producción difractiva de Jets: (a) difractivo simple, (b) difractivo	
central (doble intercambio Pomerón), (c) producción central exclusiva.la linea	
doble representa un pomerón y las lineas onduladas representan un elemento	
con estructura partonica que podría ser un protón o un pomerón (2)	8
2.1.3. Producción de pares de muones por fusión $\gamma\gamma$. La exclusiva	
. ^{el} ástica"(izquierda), la disociación de un protón (centro) y la disociación	
doble de protones (derecha) (3)	9
2.3.1.Composición del colisionador de partículas LHC (4).	11
2.4.1.Detector ATLAS (5)	13
2.4.2.Geometría interna de ATLAS, donde el eje rojo representa el haz de protones	14
2.4.3.Disposición del Detector Interno (6) .	15
2.4.4.Calorímetro Electromagnético (7).	17
2.4.5.Espectrómetro de Muones (8).	19
2.5.1.Ubicación de AFP con respecto a ATLAS (9)	21
2.5.2.Configuración de RP (10).	22
2.5.3.Componentes del SiT (10)	23
2.5.4.Localización de ToF y tiempos medidos (10).	24
3.1.1.Diferencia Δx entre la posición x en la estación Cercana y Lejana (AFP	
Lado A) como función de la coordenada x en la estación Cercana. Las líneas	
discontinuas verdes indican un ejemplo de emparejamiento de valores medidos	
de Δx y x, a partir de la cual las líneas sólidas azul y roja indican cómo se	
infieren los valores correspondientes de p_x y ξ del protón (11)	27
3.1.2.Nomenclatura usada para denominar cada una de las muestras de la GRL	30
3.1.3.Diagrama de flujo de la preselección sobre la GRL una vez es ejecutada e	~~~
imagen de la interfaz gráfica de PanDA desde la cual se sigue el procesamiento.	32
411 Fracción de energía perdida reconstruida en el detector central (derecha) y	
medida en el detector AFP (izquierda) para la señal	34
4 1 2 Fracción de energía perdida reconstruida en el detector central (izquierda) y	01
medida en el detector AFP (derecha) para el background	35
4 1 3 Diferencia de las posiciones medidas en AFP y el detector central en la estación	00
A lejana (AF) nara la señal (izquierda) y el background (derecha)	35
ri iejana (rii) para la senai (izquierua) y el background (derecha)	00

4.2.1.Distribución del Δx cuando se aplican los cortes de energía perdida	
$\xi_{AFP} > 0.02$ y $\xi_{\mu\mu} > 0.02$ aplicados sobre la senal (izquierda) y el background (derecha) para la diferencia de las posiciones.	36
4.2.2. Distribución del Δx cuando se aplica el corte de parámetro de impacto	
$\Delta z > 0.5 \text{ mm}$ aplicado sobre la señal (izquierda) y el background (derecha) .	36
4.2.3. Distribución del Δx cuando se aplica el corte de momento transvers o $P_T < 5$	
GeV aplicado sobre la señal (izquierda) y el background (derecha) 4 2 4 Distribución del Δx cuando se aplica el corte de acoplanaridad $aco < 0.01$	37
aplicado sobre la señal (izquierda) y el background (derecha)	38
4.25 Distribución del Δx cuando se aplica la restricción a la masa del bosón Z	00
entre $70 < M < 105$ GeV aplicado sobre la señal (izquierda) y el background	
$(derecha). \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots $	38
4.3.1.Distribución del background obtenido después de aplicar los cortes requeridos	
y background normalizado en la estación A lejana (AF)	39
4.3.2. Superposición del background normalizado y de la señal para la diferencia de	
posiciones en la estación A lejana (AF).	40
4.3.3. Superposición del background normalizado y de la señal para la diferencia	
de posiciones en la estación A lejana (AF) cuando no se usa el software de	
alineamiento (gráfica superior) (11) y cuando está alineada (gráfica inferior)	41
4.3.4.Diferencia de posiciones en AFP y el detector central luego de sustraer de la	
señal el background en la estación A lejana (AF)	42
4.3.5. Ajuste Gaussiano realizado sobre la resta de posiciones en la estación A lejana	
(AF)	42
.0.1. Diagrama del sistema de Tiers, con CERN en la Tier0 enviando información a	
los centros del Tier1 (12). \ldots	50
.0.2. Superposición de la señal y el background normalizado. La distribución superior	
corresponde a la estación AN. La distribución del medio corresponde a la	
estación CN y la distribución inferior corresponde a la estación CF \ldots .	51
.0.3. Substracción del background para las distribuciones de posición en cada una	
de las estaciones. La distribución superior corresponde a la estación AN. La	
distribución del medio corresponde a la estación CN y la distribución inferior	
corresponde a la estación CF	52
.0.4. Ajustes gaussianos realizados para cada una de las estaciones. La distribución	
superior corresponde a la estación AN. La distribución del medio corresponde	
a la estación CN y la distribución inferior corresponde a la estación CF	53

Capítulo 1

Introducción

El modelo estándar es la teoría que describe tres de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza, con sus respectivas interacciones. La constante necesidad de alcanzar rangos de energía más altos, ha llevado al desarrollo de modernos y potentes colisionadores que permitan revelar más y más propiedades del Modelo Estándar.

Es así como desde el descubrimiento del electrón por Thomson en 1987, hasta la confirmación de la existencia del bosón de Higgs en 2012, los detectores han ido aumentando en tamaño y sensibilidad, un ejemplo de esto es ATLAS. ATLAS es un experimento cuyo propósito es medir las propiedades más fundamentales de las partículas elementales, y las interacciones entre ellas. Está diseñado con el propósito de no solo descubrir nueva física, si no que a su vez conseguir evidencia contundente que compruebe modelos teóricos que sirvan de base para plantearse nuevos retos e ideas, en pro del entendimiento del funcionamiento del universo.

Existen eventos en los que las partículas generadas después de una interacción escapan del detector central, en ángulos muy pequeños con respecto al haz. Para la caracterización de dichos eventos, se implementaron una serie de detectores muy cercanos a ATLAS, denominados ATLAS Forward Proton (AFP). Al ser varios detectores, surge la necesidad de realizar un alineamiento global (GA), con el fin de reducir la incertidumbre en las mediciones de las posiciones y energías de los protones, y conseguir así información homogénea en todos los detectores AFP. El alineamiento es un procedimiento que se puede realizar de diversas formas, una de las cuales es de forma directa usando dispositivos especializados y la otra que corresponde a métodos indirectos que involucran el uso de software, estableciendo relaciones entre variables medibles entre detectores, en este caso entre el detector central ATLAS y el detector AFP. Las variables que se usan corresponden a la energía y la posición que se correlación mediante eventos que son producidos de la misma interacción.

El detector AFP es un conjunto de cuatro detectores denominados A lejano (AF), A cercano (AN), C cercano (CN) y C lejano (CF) ubicados a los costados de ATLAS y cuya alineación se realiza haciendo uso de las coordenadas locales del haz. El alineamiento global debe hacerse para cada una de las cuatro estaciones de AFP. En este trabajo, para realizar el GA se hace uso de un sistema de dimuones con cargas opuestas, provenientes de procesos de producción exclusiva, medidos en el detector central de ATLAS. Para ello, se tiene en cuenta variables tales como la fracción de energía perdida ξ y su correlación con la posición del sistema de dimuones reconstruidos en ATLAS y el valor esperado de la posición de los protones medido en AFP producto del mismo evento. La diferencia de dichas posiciones debe procurar estar lo más cerca posible al cero, de tal manera que se genere una reducción importante de la incertidumbre en las mediciones de AFP.

Este trabajo describe el procedimiento realizado para obtener el alineamiento global del detector AFP. En el capitulo 2 se describe el Modelo Estándar y la física de interés para el detector AFP. Posteriormente se realiza una descripción de los experimentos de física de partículas, de los detectores ATLAS y AFP junto con su ubicación en el gran colisionador de hadrones. En el capitulo 3 se describe como es el método de alineamiento global de AFP y la forma en la cual se aplicó. Luego se realiza un análisis de los resultados obtenidos luego de aplicar el alineamiento sobre las estaciones de AFP. Finalmente en el capitulo 5 se presentan las conclusiones.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Modelo Estándar

El Modelo Estándar (SM) (13)(14), es una teoría que describe las propiedades de las partículas elementales y las interacciones entre ellas, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil. La figura 2.1.1 describe el conjunto de partículas elementales que han sido predichas de forma teórica y que luego han sido halladas de forma experimental. Cabe aclarar que no es una teoría completa al no incluir la gravedad y otros fenómenos observados experimentalmente como la presencia de materia oscura, la masa de los neutrinos, etc (15).

En esencia el SM es una teoría cuántica de campos. Los campos de materia fermionica interactúan vía los bosones vectoriales que son los mediadores en la interacción. Los campos de materia se clasifican en tres generaciones o familias como las mostradas en la tabla 2.1.1. Cada generación consiste de dos leptones con su correspondiente numero leptónico; y dos quarks que poseen la propiedad del color. La fuerza nuclear débil describe la interacción entre fermiones (quarks y leptones) mediante bosones cargados W+ y W- y el bosón neutro (Z), mientras que la electrodinámica describe las interacciones que se generan entre partículas con carga eléctrica, mediante la acción de un bosón mediador denominado fotón. La fuerza nuclear fuerte describe las interacciones entre quarks mediados por gluones en y es descrita a través de la cromodinámica (QCD) (16).

	Quark	s	Leptones			
1		Primera Ge	eneracion			
Particula	Up	Down	Electron	Electron Neutrino		
Masa (MeV/c^2)	≈ 2.3	≈4.8	0.511	< 0.0022		
Carga	2/3	-1/3	-1	0		
Spin	1/2	1/2	1/2	1/2		
		Segunda G	eneracion			
Particula	Charm	Strange	Muon	Muon Neutrino		
Masa (MeV/c^2)	≈ 1275	≈ 95	105.7	< 0.17		
Carga	2/3	-1/3	-1	0		
Spin	1/2	1/2	1/2	1/2		
		Tercera Ge	neracion			
Particula	Тор	Bottom	Tau	Tau Neutrino		
Masa (MeV/c^2)	≈173070	≈ 4180	1777	< 15.5		
Carga	2/3	-1/3	-1	0		
Spin	1/2	1/2	1/2	1/2		
		Bosones	Gauge			
	Gluon	Photon	Z Boson	W Boson		
Masa (GeV/c^2)	0	0	91.2	80.4		
Carga	0	0	0	±1		
Spin	1	1	1	1		
		Bosón de	e Higgs			
	Masa 126 GeV/c^2	Carga 0	Spin 0	н		

 Tabla 2.1.1: Propiedades y organización de las partículas del modelo estándar (SM)

 (17).

Las interacciones generadas por la fuerza nuclear fuerte se originan debido a partículas conformadas a partir de dos o tres quarks denominados hadrones. La dinámica de los gluones y los quarks es interpretada a través del lagrangiano de la QCD:

$$\mathcal{L}_{QCD} = \bar{\Psi}_i \left(i \gamma^\mu \left(D_\mu \right)_{ij} - m \delta_{ij} \right) \psi_j - \frac{1}{4} G^a_{\mu\nu} G^{\mu\nu}_a, \qquad (2.1.1)$$

donde $\bar{\Psi}_i$ es una función dinámica de espacio-tiempo, D_{μ} representa la derivada covariante gauge, γ^{μ} son matrices de Dirac que conectan la representación del espinor con la representación vectorial del grupo de Lorentz y $G^a_{\mu\nu}$ representa el tensor de intensidad de campo de los gluones.

El estudio de las interacciones fuertes entre partículas es un caso particular de la teoría cuántica de campos llamada teoría de gauge no abeliana cuya simetría es de tipo SU(3). En esta los quarks y anti-quarks tienen diferentes tipos de color (rojo, azul y verde) o de anti-color y los gluones forman ocho tipos de combinaciones color-anti-color. Las estructuras particulares del grupo SU(3) implican dos propiedades importantes que son el confinamiento del color y la libertad asintótica.

La QCD, posee una serie de propiedades, entre las que se encuentran el confinamiento de color, generada debido a que se tienen cargas de color interactuando y la fuerza entre ellas permanece constante cuando unas se van alejando de las otras, los hadrónes iniciales no serán aislados, y en su lugar se producirá de forma inmediata pares quarks-antiquarks. Otra importante propiedad que se observa en la QCD es la libertad asintótica, la cual fue descubierta durante la década de los 70, e indica que entre los gluones y quarks habrá una reducción progresiva en la fuerza de interacción, a medida que haya un aumento en las escalas de energía de la misma (18).

2.1.0.1. Física Difractiva

Los procesos difractivos son aquellos procesos en los cuales no hay un intercambio de números cuánticos como, color, carga, etc, entre las partículas que interactúan. Experimentalmente, este tipo de interacciones, corresponde a señales en las cuales el protón o los protones en el estado final no fueron divididos y la perdida de energía es baja generando que estos se dispersen a ángulos pequeños con respecto al haz.

En la QCD se puede establecer una relación de proporción directa entre el factor de acoplamiento α_s y la distancia de la interacción. De tal forma que si la distancia es muy grande el acoplamiento también lo sera. Este fenómeno se denomina 'running coupling constant' y es la razón debido a la cual la interacción fuerte es llamada así. Cuando las distancias son muy pequeñas se pueden realizar cálculos mediante teorías perturbativas.

Una parte importante en QCD son los procesos duros (Hard) y suaves (soft) (2). La gran mayoría de los estudios que se realizan con colisiones hadrónicas de alta energía implican una escalas hard, por ejemplo, jets de P_T alto o bosones electro débiles. Tales procesos son relativamente bien comprendidos, debido al teorema de factorización de la QCD, que se aplica en este caso y permite el uso de cálculos perturbativos. Por otro lado, esta clase de procesos son bastante raros y solamente contribuyen en una pequeña fracción de la sección transversal total. En cambio, los mecanismos de los procesos suaves (soft) son poco conocidos debido a su naturaleza no perturbativa.

La comprensión de los procesos soft es fundamental en los estudios de alto P_T , debido a que estos son responsables del fenómeno del 'evento subyacente', en el cual cada proceso hard va acompañado de múltiples interacciones de partones espectadores. Además, debido a la luminosidad estándar del LHC, varias interacciones protón-protón ocurren en el mismo cruce de grupos (bunches) que la colisión hard de interés, este fenómeno es conocido como 'pile-up' y se encuentra caracterizado por el numero promedio de interacciones por bunche. Las partículas de las interacciones soft se superponen a la interacción de interés y deben ser sustraídas. De tal manera que un aumento en la luminosidad del haz genera un aumento del 'pile-up'.

Las interacciones protón-protón soft se pueden explicar a través de dos mecanismos, el primero de ellos es el difractivo, en el cual no existe intercambio de números cuánticos. El segundo de ellos es el no difractivo en el cual existe un intercambio en el color.

En los procesos difractivos se genera el intercambio de un objeto sin color que interactúa fuertemente (singlete de color), este es denominado Pomerón, que permite que el protón que interactúa permanezca intacto. De acuerdo a la forma que se tenga de los protones en el estado final, se pueden obtener varias señales difractivas. Si por ejemplo ambos protones permanecen intactos y no se producen partículas adicionales se trata de una dispersión elástica. Otra posible opción ocurre cuando uno o ambos protones que interactúan puede que no permanezcan intactos, sino que se disocian en un estado de varias partículas de mayor masa. Tales procesos se denominan disociación difractiva simple (o difracción simple) y disociación difractiva doble (difracción doble) respectivamente. La figura 2.1.1 muestra los diferentes procesos difractivos que podrían obtenerse luego de una colisión de protones

En los procesos de dispersión elástica, simple y doble difracción, las partículas del estado final se producen principalmente en la dirección forward. Resulta que también es posible tener interacciones difractivas con producción central de partículas. Tales procesos se denominan procesos de difracción central (CD) o de doble intercambio de Pomerón (DPE), porque se pueden considerar como la interacción de dos Pomerones, cada uno emitido de uno de los protones entrantes. Normalmente, estos procesos se consideran para el caso en que ambos protones permanecen intactos, sin embargo, también es posible tener difracción central con uno o ambos protones disociados.



Figura 2.1.1: Diagramas de Feynman de procesos soft en colisiones hadrónicas: (a) interacción no difractiva, (b) dispersión elástica, (c) disociación difractiva simple, (d) disociación difractiva doble (2).

Para la difracción en un proceso hard (2), se deben considerar dos posibles mecanismos que expliquen estos tipos de interacciones. El primero asume que los procesos difractivos hard ocurren a través del intercambio de Pomerón. En este enfoque, el Pomerón tiene una estructura partónica, descrita por funciones de estructura y distribuciones difractivas. Estas distribuciones pueden utilizarse para calcular secciones transversales para procesos difractivos hard. Es posible que un proceso difractivo hard vaya acompañado de una interacción soft adicional (del mismo par de protones iniciales). Dicha interacción soft adicional daña la señal difractiva del evento. Este efecto se tiene en cuenta en los cálculos teóricos mediante el concepto de probabilidad de supervivencia de la brecha, que cuantifica la disminución de la sección transversal para los procesos difractivos hard causada por interacciones soft adicionales.

El otro tipo de difracción hard implica dos intercambios difractivos y resulta en dos protones intactos en el estado final. En el modelo de Pomerón, este proceso se considera como una interacción entre dos protones, cada uno originado por un Pomerón. Al igual que en el caso de la difracción soft, se pueden considerar varios tipos de interacciones difractivas hard. En los procesos de difracción simple, solamente un protón participa en el intercambio difractivo y permanece intacto. El Pomerón intercambiado revela su estructura partonica y todo el proceso puede ser tratado como una interacción protón-pomerón hard y no difractiva. En la figura 2.1.2 se observan los diferentes procesos difractivos hard para producción de jets.



Figura 2.1.2: Tipos de producción difractiva de Jets: (a) difractivo simple, (b) difractivo central (doble intercambio Pomerón), (c) producción central exclusiva.la linea doble representa un pomerón y las lineas onduladas representan un elemento con estructura partonica que podría ser un protón o un pomerón (2).

2.1.0.2. Producción Exclusiva Central

La producción central exclusiva es un tipo de proceso difractivo, el cual tiene la propiedad particular de permitir medir todas las partículas del estado final. Cuando se tienen interacciones difractivas y no difractivas, algunas partículas producidas van dispersadas al tubo del haz de protones lo cual impide que sean detectadas. Para la producción difractiva exclusiva, las únicas partículas dispersadas al interior del tubo son protones intactos.

Las propiedades de los protones pueden ser medidas por el uso de por ejemplo, AFP, u otros detectores forward. La masa del objeto central puede ser determinada a través de dos formas, la primera es usando los protones que salen y la segunda es usando el decaimiento en el detector central.

Cuando se tienen en cuenta interacciones electromagnéticas, se pueden producir otros dos mecanismos de producción exclusiva. En el primero la interacción de $\gamma\gamma$, no es estrictamente una interacción difractiva, ya que no se tiene presencia de interacciones fuertes y el elemento que se intercambia no tiene números cuánticos en el vacío. Sin embargo, se puede relacionar con otros tipos de producción exclusiva. Uno de los procesos de dos fotones más comunes es la producción de pares de leptones. El segundo tipo de producción exclusiva que implica la interacción electromagnética es el proceso de fotoproducción exclusiva difractiva. En este

proceso uno de los protones intercambia un fotón, mientras que en el otro un sistema de dos gluones. Como resultado se puede producir un mesón o un par de jets (19).



Figura 2.1.3: Producción de pares de muones por fusión $\gamma\gamma$. La exclusiva .^{el}ástica"(izquierda), la disociación de un protón (centro) y la disociación doble de protones (derecha) (3).

2.2. Experimentos de física de altas energías

Los aceleradores de partículas son dispositivos experimentales diseñados con el objetivo de observar los elementos constituyentes fundamentales que conforman la materia, midiendo sus propiedades debido a las fuerzas que generan sus interacciones. La idea fundamental detrás del funcionamiento de un colisionador de partículas consiste en hacer colisionar haces de partículas a velocidades próximas a la de la luz y analizar los productos resultantes después de la interacción.

La interacción electromagnética, es decir el uso de protones, electrones, antiprotón y positrón son la base de la aceleración de partículas. Las mismas son inyectadas en el interior de un tubo al vacío con el fin de reducir la interacción con moléculas de aire. La geometría de estos puede ser lineal o circular. Los aceleradores lineales permiten que las partículas recorran una única vez el dispositivo y vean aumentada su velocidad debido a la acción de sucesivos campos eléctricos. Los aceleradores circulares, denominados sincrotrones, las partículas siguen trayectorias cerradas las cuales con cada giro que se va dando van aumentando la velocidad y su energía. Este tipo de aceleradores están compuestos de conjuntos de imanes que mantienen las partículas en su trayectoria focalizadas. Los aceleradores pueden clasificarse según la forma en que las partículas colisionan unas con otras. Existen los aceleradores de blanco fijo, en los cuales el haz se acelera para posteriormente ser extraído total o parcialmente y que este incida sobre un blanco externo fijo; o colisionadores en los cuales las partículas circulan en haces en direcciones opuestas de tal manera que se hacen chocar en puntos de interacción previamente definidos (20).

Durante el siglo XX, se han construido diversos aceleradores de partículas, en distintos laboratorios alrededor del mundo, que han permitido descubrir y medir las propiedades de las partículas elementales del Modelo Estándar. Ejemplos de ellos son el Stanford Linear Acceleration center (SLAC), ubicado en California, EEUU; los experimentos del Deutsches Elektronen Synchroton (DESY) en Hamburgo, Alemania; el Large Electron Positron (LEP) en el centro europeo para la investigación nuclear (CERN), Ginebra, Suiza; el Tevatron construido en FERMIIAB, Chicago, EEUU. En la actualidad, el acelerador de partículas en funcionamiento es el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), que se describe a continuación.

2.3. Gran Colisionador de Hadrones

El centro europeo para la investigación nuclear, CERN (21), es una entidad encargada del desarrollo científico y técnico en el campo de la Física de partículas que opera a través de la cooperación de múltiples entidades gubernamentales e independientes. Su centro de operaciones se encuentra en Ginebra (Suiza), donde está el mayor colisionador de partículas del mundo denominado Gran Colisionador de Hadrones (LHC por sus siglas en inglés) (1).

El LHC (Large Hadron Collider) (22), es un gran anillo ubicado de forma subterránea, a una profundidad de 100 metros, que posee una circunferencia de 27 km. En su interior hay dispuestos dos tubos que poseen imanes dipolos que se encargan de mantener al haz en su trayectoria y cuadrupolos que enfocan el haz, cuyo fin es realizar colisiones protón-protón y de iones pesados, con una energía de entre 13 - 14 TeV y 2.8 TeV, respectivamente. El proceso de aceleración de los protones inicia por fuera de LHC de tal manera que cuando se alcanza una energía óptima, los protones son inyectados en el tubo. Los protones viajan en bunches de 10¹¹ partículas por bunch, para posteriormente colisionar en cada uno de los diferentes puntos de interacción, ATLAS, CMS, ALICE o LHCb, como se ilustra en la Figura 2.3.1.



Figura 2.3.1: Composición del colisionador de partículas LHC (4).

En su conjunto, el colisionador posee una serie de valores nominales para los parámetros que caracterizan su funcionamiento que permiten su buen desempeño de tal forma que los datos medidos posean gran fiabilidad. Estos valores nominales se presentan en la tabla 2.3.1.

Parametros del Haz		Inyección	Colisión	
Momento del protón	[GeV/C]	450	7000	
Numero de Particulas por Bunch		1.15x	10^11	
Numero de Bunches		28	308	
Minimo espaciamiento de Bunch	[ns]	2	25	
Emitancia Longitudinal(4σ)	[eVs]	1	2.5	
Emitancia Transversal Normalizada	[µmrad]	3.5	3.75	
Corriente de Circulación del Haz	[A]	0.584		
Energia Almacenada por haz	[MJ]	23.3	362	
RMS Longitud de bunch	[cm]	11.24	7.55	
RMS Tamano del haz en IP1 e IP5	[µm]	375.2	16.7	
RMS Tamano del haz en IP2 e IP8	[µm]	279.6 70.9		
Factor de Forma Debido al Angulo de Cruce		-	0.836	
Pico Luminoso en IP1 e IP5 (L_Peak)	[cm-2s-1]	-	10^34	
Pico Luminoso en IP2 e IP8 por Bunch	[cm-2s-1]	-	3.6x10^30	
Intensidad Luminosa por Bunch cruzado	[b-1bunch-1]	-	317	
Seccion Eficaz Total p-p(σ_pp)	[mb]	67.5	111	
Eventos Totales por Bunch Cruzado		-	35	

Tabla 2.3.1: Parámetros del haz en LHC (1).

En distintos puntos alrededor del anillo se pueden encontrar detectores especialmente diseñados para obtener diferentes tipos de física. ATLAS es un detector de forma toroidal multipropósitos que tienen como objetivo medir con gran precisión las propiedades de SM al igual que hallar evidencia de nuevas partículas que den indicio a la presencia de nueva física más allá del SM. El detector CMS es un solenoide también de propósito múltiple al igual que ATLAS. LHCb es un detector diseñado especialmente para estudiar física del quark b, cuyos objetivos son la medida de parámetros de violación de simetría CP en la desintegración de hadrones que contenga quarks b, un cuarto detector es ALICE, especializado en colisiones de iones pesados con el fin de realizar estudios sobre el plasma quark-gluonico.

2.4. ATLAS

ATLAS (23)(24), es uno de los experimentos ubicados en uno de los cuatro puntos de interacción del anillo denominado IP1, que posee unas dimensiones de 45 m de longitud, 25 m de altura y un peso de aproximadamente 7000 toneladas. Inicialmente, el propósito de ATLAS fue encontrar el bosón de Higgs (H), ya detectado en 2012, que es tomado como punto de referencia para efectuar análisis que impliquen la medición de sus propiedades. Por ejemplo, mediciones de su masa, observación de diferentes canales de decaimiento o medición de su sección eficaz de producción.

También ATLAS fue diseñado para detectar indicios de nueva física más allá del Modelo

Estándar, como la presencia de nuevos bosones en rangos de energías altos, al igual que realizar mediciones de jets con P_T muy altos que podrían dar razón de nueva física. La búsqueda de corrientes neutras que cambien de sabor y la violación del lepton mediante $\tau \to 3\mu$ o $\tau \to \mu\gamma$. También mediciones $B^0 s \to \mu\mu$ y los acoplamientos de calibre triple y cuártico también pueden abrir una ventana a la nueva física.

El experimento ATLAS está compuesto por una serie de sub-detectores que permiten medir diferentes propiedades físicas de las partículas resultantes de la colisión protón-protón. Dichos sub-detectores son: el detector interno, el calorímetro electromagnético, el calorímetro hadrónico y el espectrómetro de muones. La Figura 2.4.1 muestra un esquema del detector ATLAS.



Figura 2.4.1: Detector ATLAS (5).

ATLAS utiliza un sistema de coordenadas que tiene como referencia el lugar por donde pasa el haz central, de tal forma que sobre este se ubica la coordenada +Z apuntando hacia la ubicación del experimento ALICE y -Z apuntando hacia el experimento LHCb.

Las coordenadas de X y Y pertenecen al plano transverso en la cual X está apuntando hacia el centro del anillo del LHC y Y está apuntando hacia el cielo. Sobre este plano se realiza el

calculo del momento transverso P_T . La Figura 2.4.2 muestra dicho sistema de coordenadas.

Para facilitar el análisis y la reconstrucción de eventos en ATLAS se hace uso de un sistema de coordenadas que describen una serie de particularidades para la geometría de ATLAS. El ángulo azimutal θ es medido en el plano comprendido entre los ejes Y-Z, del cual se obtiene la pseudorapidez η que se expresa en términos de θ como

$$\eta = -\ln[\tan\frac{\theta}{2}].\tag{2.4.1}$$

Adicionalmente, se tiene el ángulo polar ϕ que tiene un rango de $-\pi$ a π con respecto a X en el plano formado con Z (25).



Figura 2.4.2: Geometría interna de ATLAS, donde el eje rojo representa el haz de protones

2.4.1. Detector Interno

El Detector Interno (ID) es el nombre con el cual se denomina a la parte interior más cercana a IP1 compuesta por millones de sensores independientes, los cuales miden pequeñas descargas eléctricas dejadas por las partículas cargadas que se crean en las colisiones de los protones. Este subdetector permite reconstruir las trayectorias de dichas partículas.

El detector interno, como se muestra en la Figura 2.4.3, esta compuesto de tres partes basadas en tecnologías distintas que cubren un área superficial alrededor de un volumen de 15 metros cúbicos. Dichas partes son el detector pixel, el detector de trazas semiconductor (semiconductor tracker(SCT)) y el detector de trazas de radiación de transición (transition radiation tracker(TRT)).



Figura 2.4.3: Disposición del Detector Interno (6).

El detector pixel (26) está diseñado para obtener alta precisión en las medidas muy cercanas a IP1, que corresponden por ejemplo a la posición del vértice y la observación de partículas de vida media corta como hadrones formados por quartz b y leptones tau.

El sistema está compuesto por tres tubos con valores de radio correspondientes a 4 cm, 10 cm y 13 cm respectivamente, junto con cinco discos sobre cada costado de radios de 11 cm y 20 cm. El sistema contiene alrededor de 1500 módulos tubulares y 700 módulos de discos.

El detector de trazas semiconductor (SCT) es el elemento medio del ID y se encarga de medir las variables del rango radial intermedio. Aquellas medidas contribuyen a la determinación del momento, parámetro de impacto y la posición del vértice, así como, proporcionan un buen reconocimiento de patrones debido al alto grado de granularidad.

El SCT usa ocho capas de detectores microchip de silicio que proveen puntos de alta precisión en las coordenadas R, ϕ y Z. En total el detector consta de 61 m^2 de detectores de silicio con 62 millones de canales de lectura distribuidos por todo el volumen.

Tanto los sistemas pixel y SCT requieren que cada detector funcione a temperaturas bajas y que eliminen el calor generado por los componentes electrónicos. Por lo tanto, la estructura está diseñada con un material que posee un coeficiente de expansión térmica muy bajo.

Finalmente, se tiene el detector de trazas de radiación de transición (TRT) que en su conjunto es un sistema que permite la identificación de electrones y fotones. Para ello, el sistema TRT contiene detectores de tubo que pueden operar a las altas ratas del LHC debido a que poseen pequeños diámetros y un aislamiento de sus cables de detección ubicados en el interior de los volúmenes de gas, compuesto de 70 % Xenón, 20 % dióxido de carbono, 10 % tetrafluorometano, que ocupan un volumen total de 3 m^3 (27).

2.4.2. Calorímetros

Los calorímetros son instrumentos ubicados en el exterior del detector interno, que se encargan principalmente de medir la energía de las partículas. El sistema de calorímetros del detector ATLAS está compuesto por el calorímetro electromagnético y los calorímetros hadronicos, cada uno con la capacidad de realizar una detección particular que depende del tipo de material del que estén hechos.

El calorímetro electromagnético (ECAL)(23), (7), realiza mediciones precisas de la energía de electrones y fotones. ECAL está dividido en las partes llamadas "barrel', que tiene una cobertura en pseudorapidez $|\eta| < 1,47$ y dos tapas llamadas 'end-caps' cuya cobertura es de $1,37 < |\eta| < 3,2$. La figura 2.4.4 muestra un esquema del ECAL.

El detector posee una forma de acordeón que proporciona una simetría ϕ completa que no da lugar a espacios azimutales. Sobre la región dedicada a la física de precisión $|\eta| < 2,5$ el calorímetro esta dividido en tres secciones longitudinales que actúan como un detector de "pre-lluvia" que ayuda a mejorar la identificación de partículas.

El calorímetro hadrónico (HCAL) se encarga de realizar la detección de las partículas que no pueden ser percibidas por el ECAL debido a su naturaleza. Estas partículas corresponden a quarks y gluones dejando pasar a los muones que son identificados en el espectrómetro de muones y a los neutrinos que no podrán ser detectados.

El HCAL (23), está dividido en dos secciones denominadas TileCal y HEC. El TileCal está compuesto principalmente de hierro en cuya superficie se encuentran baldosas hechas de un material centelleante, que al interactuar con las partículas, generan fotones que son recogidos por fotomultiplicadores. El HEC está compuesto de cobre y argón líquido, que al igual que ECAL, cumple la tarea de rastrear la trayectoria y la energía dejada por las partículas que interactúan con el material. El rango de cobertura de pseudorapidez del TileCal se encuentra entre $1.5 < |\eta| < 4.9$, mientras que el rango que proporciona el HEC es de $3.1 < |\eta| < 4.9$.



Figura 2.4.4: Calorímetro Electromagnético (7).

2.4.3. Espectrómetro de Muones

Los muones son partículas que poseen la misma carga que el electrón, pero su masa es considerablemente más grande, suelen ser muy energéticos, por lo tanto, no son detectables por los calorímetros. Para medir las propiedades de los muones es necesario colocar un sub-detector en el exterior denominado espectrómetro de muones (MS).

El espectrómetro de muones tiene como fin la identificación de muones por medio de la medición de su carga y momento con base en la deflexión de las trazas debido al campo magnético generado por los imanes del interior de ATLAS. El MS consta de cuatro subdetectores denominados Monitor drift-tube (MDT), cathode strip chambers (CSC), resistive plate chambers (RPC) y thin gap chambers (TGC). Cada una de las cuales tienen una tarea definida bien sea para la identificación de la traza o para la medición de la carga y momento (28). La figura 2.4.5 muestra un esquema del MS.

El MDT consta de cámaras que proveen con gran precisión la trayectoria y curvatura de las trazas que llegan a MS con el fin de obtener el momento. Cada tubo está hecho de aluminio con un diámetro de 3 cm en cuyo interior hay una mezcla de argón y dióxido de carbono a una presión de 3 bar con una longitud de entre 0.9 y 6 metros que se agrupan en múltiples capas de 3 a 4 tubos. El CSC constituye un sistema de apoyo para la medición del momento de los muones en cada de una de las regiones del MS. Está compuesto por múltiples hilos ubicados en el interior de 32 capas, cada una constituida por cuatro subcapas que también, al igual que MDT están llenas de argón y dióxido de carbono.

Los RPCs, consiste en dos placas paralelas hechas de un material altamente resistivo en cuyo interior se deposita un gas que es ionizado por los muones. Este sub-detector permite medir la posición a lo largo de los tubos de MDT. Los TGCs tienen un diseño similar al de las cámaras multihilos, con la diferencia de que el paso del cable del ánodo es mayor que la distancia cátodo-ánodo. Las señales de los hilos del ánodo dispuestas en paralelo a los hilos del MDT, proporcionando la información del trigger.



Figura 2.4.5: Espectrómetro de Muones (8).

2.4.4. Trigger

El trigger y sistema de adquisición de datos constituyen un sistema fundamental en la selección de eventos que son de potencial interés para su posterior análisis. El trigger utilizado durante la corrida 2¹ del LHC, está compuesto de dos niveles encargados de seleccionar la información, denominados Level-1 (L1), basada en hardware y High level trigger (HLT) basado en software.

El L1, que es el punto inicial de identificación de los eventos, se encarga de reducir la granularidad de la información que se deriva principalmente de los calorímetros y del espectrómetro de muones y que finalmente son almacenados proporcionando regiones de interés que son elegidas como puntos de partida para el HLT.

El siguiente nivel el HLT, también realiza una selección de información por medio de software. Este nivel de análisis está constituido por dos partes que tienen como tareas en primer lugar realizar reconstrucciones de pequeños eventos que son almacenados en el tier-0, nombre con el que se conoce al primer nivel de almacenamiento localizado en Ginebra, para posteriormente realizar la reconstrucción completa del evento con un alto grado de precisión. Esto se define mediante diferentes softwares especializados en cada tipo de partículas, por ejemplo

¹El periodo de toma de datos correspondiente a los años 2015-2018 se conoce como corrida 2 del LHC.

electrones-fotones, Muones, etc (29).

2.5. Detector AFP

El AFP (ATLAS Forward Proton detectors) (2), es un detector diseñado para medir protones que son emitidos en ambas direcciones desde la región de interacción central en ATLAS. Los protones pierden cierta cantidad de energía en la colisión y son emitidos en ángulos del orden de los μrad con respecto a los haces de partículas incidentes. Estos protones permanecen dentro del tubo que aloja al haz, pero separado de este debido a la dispersión que han sufrido. A 200 m desde el punto de interacción del detector ATLAS, estos protones estarán lo suficientemente separados de la órbita nominal del haz, de tal forma que podrán ser interceptados por detectores al interior de contenedores tipo Roman Pots que han sido instalados en el tubo del haz.

Los protones medidos en los detectores AFP corresponden a eventos en los cuales uno o dos protones permanecen intactos luego de la colisión en el punto de interacción en ATLAS y que están asociados a dispersiones elásticas y difractivas.

La desviación depende de la energía pérdida y del ángulo de emisión en el IP. El lugar donde se ubicó AFP se fijó teniendo en cuenta que no hay ningún tipo de acción invasiva sobre el haz y especialmente con los instrumentos de medición, adicionalmente su diseño permite que se tenga la suficiente dispersión de partículas.

Para caracterizar el protón emitido son necesarias dos medidas: la medición de posición transversal y la medición de los ángulos locales. La unión de estas medidas darán la fracción de energía pérdida del protón , de acuerdo con:

$$\xi = 1 - \frac{E_{protn}}{E_{beam}},\tag{2.5.1}$$

y el cuadrimomento transferido del protón, según:

$$\sqrt{-t} = 2\sqrt{E_p E_b} \sin\frac{\theta}{2},\tag{2.5.2}$$

donde θ representa el ángulo de emisión, E_p es la energía del protón emitido y E_b la energía del haz.

2.5.1. Disposición de AFP

La ubicación del detector AFP esta entre los 204 m y 217 m a los costados del punto de interacción central en ATLAS, los cuales se localizan más precisamente entre los cuadrupolos Q5 y Q6 del LHC, tal como se observa en la Figura 2.5.1.



Figura 2.5.1: Ubicación de AFP con respecto a ATLAS (9).

El detector AFP está compuesto por cuatro estaciones RP, dos de ellas están en el lado negativo, es decir, sobre la coordenada -Z del haz y las otras se ubican al lado +Z. Cada una de ellas consiste de una estación cercana y otra lejana con respecto al punto de interacción en las cuales se encuentran ubicados los componentes principales del AFP. Por un lado, en las estaciones cercanas se encuentran los Silicon Tracker (SiT) que tienen como tarea medir la posiciones de los protones dispersos, por el otro, en las estaciones lejanas no solo hay SiTs, sino también, detectores de tiempo de vuelo (Time of Flight (ToF)), que tienen como función reducir el pile-up en las interacciones.

En resumen, por cada estación a los costados se pueden encontrar en total cuatro detectores de trazas de silicio y dos detectores de tiempo colocados en el interior de un Roman pot (2), tal como se describe a continuación.

2.5.2. Roman Pot

Las RP son dispositivos móviles especiales que se insertan directamente en el tubo del vacío del haz para la detección de protones que provienen de la dispersión elástica o difractiva en el punto de colisión. Esta técnica permite instalar detectores especiales dentro de los RPs, los cuales se pueden aproximar lo más cerca posible al haz de partículas de una forma segura (30).

El movimiento de RP está a cargo de un motor que va desplazando de forma pausada el dispositivo, cuyo monitoreo está a cargo del mismo motor. Para no afectar el vacío existente en el tubo principal del haz al interior de cada RP, existe un sistema de vacío que se compensa mediante un sistema de fuelles que se ubica en cada una de los RPs y que está conectado mediante brazos de equilibrio a cada una de los mismos. Los brazos de equilibrio también conectan los RP a resortes de extracción de emergencia en caso de que el motor llegue a fallar (2). La configuración de las RP se observa en la Figura 2.5.2.



Figura 2.5.2: Configuración de RP (10).

2.5.3. Silicon Tracker Detector

El Silicon tracker (SiT), es el instrumento de detección principal de AFP cuyo propósito es medir los puntos a lo largo de la trayectoria de los protones. Aquellos se generan debido a la acción de los imanes dipolo, causantes de que el camino que sigue el protón se curve, y los cuadrupolos que lo mantienen sobre la trayectoria. La información obtenida permite la reconstrucción del evento y la identificación de la energía perdida (ξ), al igual que la transferencia de momento.

Los SiTs están basados en la implementación de detectores híbridos de silicio cuya parte sensible está acoplada a un chip de lectura ubicado en la parte delantera de la lámina, como se puede observar en la figura 2.5.3. Los chips de lectura están conectados mediante un cable de alta densidad al exterior de los RPs cuya labor es permitir la entrada y salida de datos, y la de comandos de activación del sistema de adquisición de datos.

Cada sensor está montado sobre una tarjeta portadora compuesta de fibra de aluminio y carbono que sirven de soporte mecánico y conductor térmico. La tarjeta portadora está ubicada en un intercambiador de calor de aluminio a un ángulo de inclinación de 14 grados, que se encarga de tomar aire frío y distribuirlo al interior de RP de tal manera que se disminuya la temperatura, tal como se muestra en la Figura 2.5.3 (2).



Figura 2.5.3: Componentes del SiT (10).

2.5.4. Time of Flight Detector

El Time of Flight (ToF) es un detector que tiene como tarea reducir el pile-up a altas luminosidades. Dado que las colisiones difractivas simples que producen forward protons son relativamente comunes (10% del total de la sección transversal), se puede confundir fácilmente con una de doble difracción, ya que estos dos eventos tienen características cinemáticas semejantes y el único aspecto que puede diferenciarlos es el tiempo de llegada a los brazos de las RPs.

Por otra parte, el detector ToF determina el vértice primario de interacción de los dos protones, midiendo el tiempo de llegada, mediante la expresión

$$\Delta z = \frac{c}{2} \left(t_A - t_C \right), \tag{2.5.3}$$

donde las variables t_A y t_C corresponden a las medidas de tiempo en las posiciones A y C próximas a las RP, los cuales posteriormente pueden ser comparadas con el vértice de interacción medido en ID, como se observa en la figura 2.5.4.(2).



Figura 2.5.4: Localización de ToF y tiempos medidos (10).

Capítulo 3

Alineamiento Global

3.1. Alineamiento

El alineamiento global de cualquier detector es un proceso obligatorio y complejo. Algunas de las técnicas empleadas para alinear un detector en el LHC usan láser o instrumentos especializados, otros usan técnicas indirectas. Esta última es un ejemplo para el alineamiento global de los detectores AFP (3)(31).

El método de alineamiento global para el detector AFP emplea la información obtenida en producción de pares exclusivos $\mu^+\mu^-$ a 13 TeV con luminosidades integradas de 19.2 fb^{-1} en el proceso $pp \rightarrow p\mu^+\mu^-p$, Utilizando los detectores AFP y los Beam position Monitors. El sistema de dimuones es medido en el detector central de ATLAS, y el protón del estado final se registra en los detectores AFP. Los protones que han perdido una pequeña fracción ξ de su energía, son desviados fuera de la envoltura del haz de tal manera que sus trayectorias pueden ser medidas en dichos detectores.

La estrategia fundamental del método es medir la diferencia entre dos posiciones espaciales en la dirección x. La primera de ellas, es la posición $X_{\mu\mu}$ reconstruida del sistema de dimuones en el punto de interacción (IP) en el detector ATLAS. La segunda posición en X_{AFP} , es la posición reconstruida de los protones usando la información recolectada por los detectores AFP. Para calcular está última, la cual está relacionada con la fracción de energía perdida ξ (calculada con la información de los dimuones en el IP), se usa una función polinomial cuadrática en ξ . Como se describe en la sección 3.1.1.

La desviación del valor cero que se obtiene de la diferencia resultante entre las dos posiciones en x descritas anteriormente, revela la magnitud de la corrección necesaria para el alineamiento global y también la eficiencia en el alineamiento.

3.1.1. Reconstrucción del Protón

La cinemática de los protones reconstruidos (11), es expresada en términos de la fracción de energía perdida ξ y de la componente de la cantidad de movimiento perpendicular a la línea del haz, denominado momento transverso del protón p_T en el punto de interacción IP en ATLAS. Dado que hay valores muy grandes de fracción de energía perdida ξ , y que estos están correlacionados con la deflexión del haz, se establece que la relación más evidente ocurre sobre el eje x.

El análisis del momento transverso de los protones debe ser realizado sobre la componente X, debido a que el eje Y tiene una dependencia constante con relación a los cambios que se generan en los puntos de colisión de los haces, lo cual dificulta su reconstrucción. Se establece una magnitud Δx que representa la diferencia de los valores de las coordenadas en X para ambas estaciones (Cercana y lejana) el cual es asociado al ángulo de la trayectoria del protón en el plano X-Z con respecto al haz. Luego tomando solo la posición x en la estación cercana y el Δx , se puede reconstruir la cinemática del protón en términos de la fracción de energía perdida y de su p_T (Ver figura 3.1.1).

Luego de la determinación de la fracción de momento perdida del protón reconstruido, se parametriza una función de posición x en AFP la cual depende de ξ y tiene la forma

$$X(\xi) = -119\xi - 164\xi^2, \tag{3.1.1}$$

donde $X(\xi)$ describe la posición espacial en el detector AFP.



Figura 3.1.1: Diferencia Δx entre la posición x en la estación Cercana y Lejana (AFP Lado A) como función de la coordenada x en la estación Cercana. Las líneas discontinuas verdes indican un ejemplo de emparejamiento de valores medidos de Δx y x, a partir de la cual las líneas sólidas azul y roja indican cómo se infieren los valores correspondientes de p_x y ξ del protón (11).

3.1.2. Selección de Eventos

La selección de eventos exclusivos de dimuones se realiza antes de establecer una correlación con los protones forward, teniendo en cuenta que sean producto de una fusión fotónica. En ese sentido la señal procesada de muones $\gamma \gamma \rightarrow \mu \mu$ debe poseer carga opuesta para los leptones, siendo la masa invariante de estos mayor a 20 GeV.

Posterior a la preselección se realiza una selección exclusiva central de eventos en la cual el momento transverso del sistema de dimuones $p_T(\mu\mu)$ debe ser menor a 1.5 GeV. Los muones producidos son back-to-back, es decir se generan exactamente en el centro del detector y luego de la colisión, salen dispersos en direcciones opuestas cumpliendo con la condición $|\phi_2 - \phi_1| = \pi$, de la cual se obtiene la acoplanaridad, representada en la expresión siguiente

Selección Exclusiva Central							
Observable	Selección						
$P_T(\mu\mu)$	$< 1.5 \mathrm{GeV}$						
Acoplanaridad	< 0.01						
$N_{tracks}^{P_T > 500MeV} Z_0(track, \mu\mu) < 1mm$	Exactamente 0						

 Tabla 3.1.1:
 Selección de eventos exclusiva central

$$a = 1 - \frac{|\Delta\phi_{\mu\mu}|}{\pi}.$$
(3.1.2)

También es necesario que el número de trazas con un momento transverso p_T mayor a 500 MeV y parámetro de impacto Z_o menor a 1 mm, sea exactamente igual a cero. Finalmente, la fracción de momento perdido dependerá de la masa invariante del sistema de dimuones $m_{\mu\mu}$ y de la pseudorapidez η .

El valor de $\xi_{\mu\mu}$ debe cumplir con un rango de valores para ser considerado una señal

$$0.02 < \xi_{\mu\mu} < 0.1. \tag{3.1.3}$$

Un resumen de la selección de eventos se puede ver en la tabla 3.1.1

3.1.3. Método de alineamiento

El proceso de alineamiento del detector se reduce a la obtención de la coordenada X (posición) de los segmentos de traza reconstruida en cada una de las estaciones con respecto al haz. El valor de la posición relativa al haz, medida en los SiTs, depende de una serie de parámetros que incluyen varias interacciones con el haz, tal como se observa en la siguiente expresión:

$$x = x_{RP} - x_{BC} + x_{Tracker}, aga{3.1.4}$$

donde x_{RP} representa la posición relativa de las RPs en relación con el haz, x_{BC} es la distancia entre el centro del haz y el centro del tubo por donde pasa el haz, y finalmente $x_{Tracker}$ representa la distancia entre las RPs y el borde de los SiTs. Dada la relación de x con la fracción de momento perdido ξ , se pueden describir la cinemática del protón y la alineación en términos de la distancia.

Para este proceso de alineamiento y para un ideal funcionamiento del detector, se espera que los valores de ξ obtenidos en AFP y en el detector central sean iguales. Ahora teniendo en cuenta que las correcciones se realizan sobre la variable x, se espera que la diferencia de Δx tenga valores no nulos, pero que por el contrario se reduzca significativamente y aproxime al valor de cero.

En la práctica, el alineamiento se realiza usando software especializado que permite aplicar los ajustes necesarios sobre las variables de interés. Es así como en la parte inicial del procedimiento se realiza una selección y creación de una base de datos de protones tomados por debajo de la aceptancia mínima de ξ en AFP.

Luego mediante el método de Boostrap, que corresponde a una técnica estadística para estimar cantidades sobre una población promediando estimaciones de múltiples muestras de datos pequeños los cuales serán la base para crear otros grupos de muestras con características del original, y el conjunto de protones por fuera de la aceptancia mínima, se realiza la obtención de dos distribuciones, una representa la señal y la otra representa el background.

Finalmente, lo que se realiza es una normalización del background hacia afuera del pico, con el fin de eliminar la cola que se forma a los costados, esto último mediante la diferencia de la señal-background. Sobre este resultado, se realiza un ajuste gaussiano que da cuenta de el alineamiento en términos de la distancia con relación a las mediciones realizadas tanto en AFP como en el detector central (31).

3.1.4. Conjunto de Datos Procesados

El alineamiento global del AFP se realizo con datos recolectados por el detector ATLAS durante el año 2017 a $\sqrt{13}$ TeV. Se utilizaron 64 muestras. Los conjuntos de datos están etiquetados usando la estructura presente en la figura 3.1.2, donde además de indicar el número de identificación de la muestra, también se da información acerca del tipo de física para el que fue seleccionado, el año, la energía del haz, etc. La gestión de los datos se realizó

a través del uso de varias herramientas. Ver apéndice A.

data17_13TeV.00329716.physics_Main.deriv.DAOD_STDM7.r10203_p3399_p4397

Figura 3.1.2: Nomenclatura usada para denominar cada una de las muestras de la GRL.

```
329716, 329780, 329835, 329964,
330025, 330074, 330079, 330160,
334264, 334317, 334350, 334890,
334907, 334960, 334993, 335016,
335022, 335056, 335082, 335083,
335131, 335170, 335177, 335222,
335282, 335290, 336506, 336548,
336567, 336630, 336678, 336719,
336782, 336832, 336852, 336915,
336927, 336944, 336998, 337005,
337052, 337107, 337176, 337215,
337263, 337335, 337371, 337404,
337451, 338183, 338220, 338259,
338263, 338349, 338480, 338834,
338846, 338897, 338933, 338967,
338987, 339037, 340368, 340453
```

GRL: 64 Dataset of 2017

 Tabla 3.1.2: ID de los conjuntos de datos de la GRL requeridos para el alineamiento de AFP.

El proceso de localización de los conjuntos de datos se da a través de una interfaz llamada ATLAS metadata interface (AMI). AMI es un sistema de catalogación de datos que es usado para buscar conjuntos de datos utilizando criterios físicos de acuerdo al tipo de análisis que se requiera hacer. También es empleado para realizar el seguimiento del tamaño de las muestras reconstruidas y llevar un control de la nomenclatura (32). La Good Run List (GRL) es principalmente un conjunto de datos de buena calidad, verificados, que se pueden utilizar para realizar análisis. La luminosidad de una GRL indica cuántos datos de colisión se certificaron para uso físico durante un período de tiempo determinado. Al comparar la luminosidad integrada de un GRL con la luminosidad integrada registrada por ATLAS para un conjunto de datos dado, se puede determinar la eficiencia de la calidad de los datos para ese conjunto de datos. En otras palabras, qué porcentaje de los datos registrados tiene una

Preselección	
Observable	selección
Pseudrapidez η	< 2.4
Carga de los leptones	$\mu^+\mu^-$
Acoplanaridad	a < 0.01
Localizar trazas menores a 1 mm del vértice del dimuon.	

Tabla 3.1.3: Restricciones en la preselección.

calidad suficientemente alta para el análisis físico. La tabla 3.1.2 muestra los datos de la GRL usados para el alineamiento.

3.1.5. Proceso de Selección dimuones y Alineamiento Global

La preselección y alineamiento de eventos se realiza utilizando dos frameworks, un framework de selección, el cual obtiene los eventos de interés y el otro framework es de alineamiento. El código de preselección de candidatos hace uso de librerías específicas para el estudio de leptones, tales librerías corresponden a criterios de identificación y de aislamiento de muones (33), tomando como entrada los conjuntos de datos provenientes de la GRL.

Los criterios de preselección se muestran en la tabla 3.1.3.

La forma en la cual se realiza la preselección de datos se describe en el diagrama representado en la figura 3.1.3, se monitorea a través de una interfaz denominada Production ANd Distributed Analysis system (PanDA) la cual visualiza el procesamiento de los datos.

Una vez procesados los datos, se obtienen dos conjuntos, denominados señal y background. Ambos conjuntos son utilizados para generar las variables de interés del análisis final.

Se aplican criterios de selección adicionales sobre las variables para obtener las condiciones esperadas en el alineamiento del detector. Dichos criterios pueden observarse en la tabla 3.1.4.

Con los cortes aplicados a las variables que describen la posición X_{AFP} y $X_{\mu\mu}$ tanto para el background como para la señal, se obtiene la diferencia de las distribuciones de posición

Muestres dates 2017	ATLAS	PanDA	Dash- Tas	ks* Jobs	- Errors- l	lsers - Sites	 Harveste 	r∙ MyBiç	gPanDA	J	ob by ID	• Ente	۹	Prodsys * 9	ervices -	Help* 🛓	Carlos Andres
Muestias datos 2017	26635570 ta	5635570 task: user.cpinzono.EcclusiveCandidates.rums2017d1grupo12345/ aipanda206 09-16 00:19.3									19:33, Refres						
	2663557	26635570 task															
Código de Preselección	Task ID	Туре	Processin	g type	User		Nucleus	Task status	N i ev	nput rents used	N output events	HS06*sec Expected Total done failed	N input files finished failed	Time stamps: created last modified	Cores	Priority	Attempt
	2663557	0 analy	panda-clie jedi-run	nt-1.4.88-	Carlos An Osorio	Ires Pinzon	-	done	298 298 (1)	8,688 3,688 00%)	0		29 29 (100%)	2021-09-09 02:04:03 2021-09-09 02:31:19	1	1001	0
Grid	Task extra info * Show jobs * Task parameters and help * Memory & walltime usage * Other plots *																
	States of jobs in this task [drop mode]																
		pending	defined	waiting	assigned	throttled	activated	sent	starting	running	holding	transferring	mergin	g finished	failed	cancelled	closed
	Build													2			
Almacenamiento y	Run													1			
descarga por Rucio	Merge													1			

Figura 3.1.3: Diagrama de flujo de la preselección sobre la GRL una vez es ejecutada e imagen de la interfaz gráfica de PanDA desde la cual se sigue el procesamiento.

Selección								
Observable	selección							
ξ_{AFP}	> 0.02							
$\xi_{\mu\mu}$	> 0.02							
$ \Delta z $	> 0.5 mm							
P_T	$< 5 { m GeV}$							
a	< 0.01							
Masa del bosón Z (M)	70 < M < 105 GeV							

Tabla 3.1.4: Valores por defecto aplicados en los cortes sobre los histogramas de posición.

$$X_{AFP} - X_{\mu\mu}$$

Posteriormente, se realiza la normalización de la distribución de la diferencia de posiciones del background en un rango de valores que se tomó desde -1 a -15, con el fin de eliminar la cola que se genera a la izquierda de la distribución de diferencia de posiciones de la señal. Con la distribución obtenida, es posible estimar el valor de discrepancia entre las posiciones medidas en el detector AFP y el detector central (sistema de dimuones).

Capítulo 4

Análisis

El análisis se realizó con base en los datos obtenidos de la señal y el background para la estación A lejana (AF), después de usar el software especializado para el alineamiento. En un primer instante, se estudia el comportamiento de la fracción de energía perdida ξ reconstruida en AFP y en el detector central y de la diferencia de las posiciones $X_{AFP} - X_{\mu\mu}$. Posteriormente, se estudia como es el comportamiento de la diferencia de las posiciones a medida que se van aplicando restricciones sobre la misma. Finalmente, para dar cuenta del alineamiento, se realiza un ajuste sobre la diferencia de posiciones teniendo en cuenta la sustracción del background sobre la señal.

En el apéndice C se presentan los resultados correspondientes a las demás estaciones: C lejana (CF), C cercana (CN) y A cercana (AN), siguiendo el mismo procedimiento realizado con la estación AF con el fin de dar cuenta del alineamiento global del detector AFP.

4.1. Señal y Background

Una vez se ha realizado el proceso de alineamiento con la información disponible desde las medidas en el detector central y en los detectores AFP, se obtienen dos conjuntos de datos: los correspondientes a la señal y el background. Cada uno de estos datos está compuesto por un grupo de observables, entre los que se destacan la posición reconstruida de los protones desde el detector central, $X_{\mu\mu}$, la posición de los protones medida en los detectores AFP, X_{AFP} y la fracción de energía perdida ξ , también reconstruida desde las medidas del detector central y desde los detectores AFP.

La fracción de energía perdida ξ reconstruida para la señal en el detector central y medida en AFP comprende en su mayoría el intervalo de aceptancia cuyos valor se presentan en la sección 3.1.2. En la figura 4.1.1 se puede observar las distribuciones para la señal de la fracción de energía perdida ξ medida en los detectores AFP y reconstruida en el detector central para el caso de la estación AF, donde se obtienen 75158 eventos. En la figura 4.1.2 se observan las mismas distribuciones, pero en este caso para el background, la cantidad de eventos que se obtiene es 1188182.



Figura 4.1.1: Fracción de energía perdida reconstruida en el detector central (derecha) y medida en el detector AFP (izquierda) para la señal.

Una vez se observó el comportamiento de ξ tanto en el background como en la señal, se procedió a realizar los gráficos que representaran la diferencia de posiciones asociadas a los ξ , observando que la mayor cantidad de eventos se encuentran en el rango que va desde los -20 mm a 6 mm. Se puede observar que el máximo de las distribuciones es próximo a cero, tanto para la señal como para el background, como se observa en la figura 4.1.3.



Figura 4.1.2: Fracción de energía perdida reconstruida en el detector central (izquierda) y medida en el detector AFP (derecha) para el background.



Figura 4.1.3: Diferencia de las posiciones medidas en AFP y el detector central en la estación A lejana (AF) para la señal (izquierda) y el background (derecha).

4.2. Restricciones Aplicadas sobre $\xi_{AFP} - \xi_{\mu\mu}$

El alineamiento se produce realizando cortes en forma sucesiva sobre las distribuciones que representan la diferencia de posiciones, de tal manera que va reduciendo el número de eventos aceptados, y en consecuencia el máximo de la distribución se acerca aún más a cero.

Al aplicarse el primer corte correspondiente a la fracción de energía perdida, se encuentra que la cantidad de entradas disponibles se reduce en un 78,2%, lo cual indica que solo el 21,8% de los eventos son representados en la distribución de señal y de background, por lo cual los rangos de energía son ajustados y asociados a un rango de distancia que se encuentra

entre los -15 mm y 5 mm, de acuerdo a la figura 4.1.3



Figura 4.2.1: Distribución del Δx cuando se aplican los cortes de energía perdida $\xi_{AFP} > 0.02$ y $\xi_{\mu\mu} > 0.02$ aplicados sobre la señal (izquierda) y el background (derecha) para la diferencia de las posiciones.

A continuación, se aplicó un corte sobre el valor absoluto del parámetro del impacto correspondiente a trazas que sean mayores a 0.5 mm con el fin de suprimir eventos generados por procesos hadrónicos. Al ser aplicado este corte, la cantidad de entradas se reduce en un 95.3% tanto en la señal como en el background con respecto a lo observado en la distribución de la figura 4.1.3. Ver distribuciones de la figura 4.2.2



Figura 4.2.2: Distribución del Δx cuando se aplica el corte de parámetro de impacto $\Delta z > 0.5$ mm aplicado sobre la señal (izquierda) y el background (derecha)

Con relación al número de trazas, se requiere que estas tengan un $P_T < 500$ MeV, lo cual

genera una reducción de las entradas del 97.6 %. Para este corte se puede observar un pico central definido en inmediaciones del cero, al mismo tiempo que se puede notar una cola que se forma a la izquierda de la distribución. Esta es más notable sobre la señal que sobre el background, tal como se observa en la figura 4.2.3.



Figura 4.2.3: Distribución del Δx cuando se aplica el corte de momento transverso $P_T < 5$ GeV aplicado sobre la señal (izquierda) y el background (derecha).

Por tratarse de eventos que provienen de colisiones elásticas, con ángulos de dispersión muy pequeños y ser considerados back to back, la acoplanaridad debe ser limitada a eventos menores a 0.01. Aplicando este corte se obtuvo una reducción de las entradas aproximadamente de un 98.9% con relación al estado inicial sin cortes, figura 4.1.3. Cabe resaltar que la media de la distribución se acerca mucho más a cero, como se observa en la figura 4.2.4.

Finalmente, se realiza una restricción sobre la masa del bosón Z, suprimiendo valores entre los 70 y 105 GeV. El número de eventos se ha reducido considerablemente, al igual que las entradas, en un 99.7% aproximadamente. Se observa aún una cola a la izquierda de la distribución en la señal y una notable reducción en la media de la misma, como se observar la figura 4.2.5.

Hay una reducción bastante pronunciada en la cantidad de eventos luego de que se aplica sobre la distribución de la figura 4.1.3 las restricciones sugeridas para realizar el calculo del Δx . Tal como se observa en la tabla 4.2.1.



Figura 4.2.4: Distribución del Δx cuando se aplica el corte de acoplanaridad aco < 0,01 aplicado sobre la señal (izquierda) y el background (derecha).



Figura 4.2.5: Distribución del Δx cuando se aplica la restricción a la masa del bosón Z entre 70 < M < 105 GeV aplicado sobre la señal (izquierda) y el background (derecha).

Eventos por Restricción										
Observable	Señal	Background	Porcentaje							
Sin restriccion	75158	1188182	100%							
ξ_{AFP} y $\xi_{\mu\mu}$	16409	259309	21.8%							
$ \Delta z $	3471	54765	4.6%							
P_T	1735	27574	2.3%							
Acoplanaridad	773	12292	1.0%							
Masa del bosón Z (M)	219	3491	0.2%							

Tabla 4.2.1: Disminución de eventos con relación a las restricciones aplicadas.

4.3. Ajuste Gaussiano

La distribución de la diferencia de posiciones para la estación A lejana (AF), fue normalizada a la región de rechazo (o cola) de la señal, tal como se indicó en la sección 3.1.3. Los límites de la normalización se establecen entre -15 mm y 5 mm, de tal forma que sustrayendo el background se pueda eliminar la cola generada en la distribución de la señal de la figura 4.2.5

Comparando el background normalizado con el background sin normalizar, como se muestra en la figura 4.3.1, se puede observar que conservan la misma forman de la distribución. Si se realiza la superposición de la distribución de posición del background normalizado con la señal, se observa la contribución del background, especialmente a la izquierda del pico de la distribución, como se muestra en la figura 4.3.2.



Figura 4.3.1: Distribución del background obtenido después de aplicar los cortes requeridos y background normalizado en la estación A lejana (AF).

Después de obtener la normalización, se procedió a restar el background normalizado de la señal, obteniéndose una distribución en la cual hay un aplanamiento de la cola en la distribución de la señal, al mismo tiempo que se obtiene una reducción del número de entradas, pero no de eventos, tal como se muestra en la figura 4.3.4.

Finalmente, se hizo un ajuste Gaussiano a la distribución de la figura 4.3.3, teniendo en cuenta límites de simetría entre el -1 y 1, el cual da cuenta del alineamiento del detector AFP en su brazo A lejano (AF). La media de la distribución tiene un valor de 0,01655 mm. como se muestra en la figura 4.3.5.



Figura 4.3.2: Superposición del background normalizado y de la señal para la diferencia de posiciones en la estación A lejana (AF).

En la figura 4.3.3 se observa cómo es la distribución de la diferencia de posiciones cuando no se aplica el software de alineamiento. Es claro que la distribución esta bastante alejada del cero hacia la izquierda antes de ser alineada. Luego del alineamiento, la distribución obtiene una posición de su pico muy cercana al cero.

Los alineamientos realizados sobre las estaciones AN, CN y CF se pueden observar en el apéndice, sección C.



Figura 4.3.3: Superposición del background normalizado y de la señal para la diferencia de posiciones en la estación A lejana (AF) cuando no se usa el software de alineamiento (gráfica superior) (11) y cuando está alineada (gráfica inferior)



Figura 4.3.4: Diferencia de posiciones en AFP y el detector central luego de sustraer de la señal el background en la estación A lejana (AF).



Figura 4.3.5: Ajuste Gaussiano realizado sobre la resta de posiciones en la estación A lejana (AF).

Capítulo 5

Conclusiones

- A pesar de generar millones de eventos por colisión, finalmente la cantidad de eventos producidos por protones totalmente elásticos son muy bajos en comparación con los generados debido a múltiples interacciones. Por lo tanto, al aplicar las restricciones en el alineamiento solo se dispone de unos cuantos eventos, que finalmente, son los que dan razón de la alineación global.
- 2. Es importante resaltar el hecho, de que los cuatro detectores de AFP están ubicados en un rango de distancias diferentes con respecto a ATLAS, por lo cual se producen diferentes distribuciones de diferencia de posición en cada una, lo cual indica que el grado de ajuste que se debe realizar sobre cada una es diferente.
- 3. Aunque todas las estaciones poseen la misma cantidad de entradas después del proceso de alineamiento, se observa que después de aplicar las respectivas restricciones sobre cada una de las estaciones, y realizar el ajuste sobre las regiones de interés (-1,1), la cantidad de entradas disminuye notablemente, y aún más interesante poseen valores finales diferentes en cada una.
- 4. El efecto del alineamiento se puede analizar a través de cuan cerca del cero se encuentra el pico de cada distribución. Por lo tanto, se puede afirmar que las estaciones lejanas (AF y CF) responden mucho mejor al alineamiento global que las estaciones cercanas (AN y CN), debido a que la media del ajuste se encuentra mucho más cercana a cero en comparación con las otras dos estaciones.

5. Los valores obtenidos para el Δx son usados para estimar las incertidumbres sistemáticas de la medición en cada una de las estaciones.

Bibliografía

- [1] C. LHC, "The large hadron collider. Technical report, cern/ac/95-05 url: http://lhc.web.cern.ch/lhc," 1995.
- [2] CERN, "ATLAS COLLABORATION. Design Report for ATLAS Forward Proton Detector. tech. rep, CERN-LHCC-2015-009. ATLAS-TDR-024. url: https://cds.cern.ch/record/2017378," 2015.
- [3] V. Petousis, "AFP detectors global alignment using exclusive 3 dimuons and Run-by-Run BPM values, ATL-COM-FWD-2020-002. ATLAS internal," 2019.
- [4] CERN, "Accelerator complex, OPEN-PHO-ACCEL-2016-009. url: https://cds.cern.ch/record/2197559," 2016.
- [5] J. Pequenao, "Computer generated image of the whole ATLAS detector, CERN-GE-0803012. https://cds.cern.ch/record/1095924," 2008.
- [6] J. Pequenao, "Computer generated image of the whole ATLAS Inner Detector, CERN-GE-0803014. https://cds.cern.ch/record/1095926," 2008.
- [7] "ATLAS COLLABORATION. Liquid Argon Calorimeter Technical Design Report, CERN-LHCC-96-041. ATLAS-TDR-2. url: https://cds.cern.ch/record/331061," 1996.
- Computer [8] J. "ATLAS COLLABORATION. Pequenao, generated image of the whole ATLAS muons subsystem, CERN-GE-0803017. url: https://cds.cern.ch/record/1095929," 2008.
- [9] "ATLAS COLLABORATION, Measurement of proton-tagged lepton pairs in 3 photon fusion using the ATLAS Forward Proton 4 spectrometer." Internal note.
- [10] I. López, "The one armed atlas Forward Proton detector," 2018.
- [11] "ATLAS COLLABORATION, Performance of the ATLAS Forward Proton Spectrometer during high luminosity 2017 data taking."
- [12] C. CERN, "The LHC's worldwide computer, https://cerncourier.com/a/the-lhcsworldwide-computer/," 2019.
- [13] S. Glashow, "Partial-symmetries of weak interactions, Nucl. Phys. 22, 579. Url: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0029558261904692," 1961.
- [14] S. Weinberg, "A model of lepton. Phys.Rev.Lett. 19, 1264. Url: https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/physrevlett.19.1264," 1967.

- [15] M. Peskin, "Supersymmetry in elementary particle physics. SLAC PUB-13079 Url: https://arxiv.org/abs/0801.1928."
- [16] T. Muta, "Foundations of quantum chromodynamics. World scientific," 1998.
- [17] C. Tomé, "Del modelo estándar, Url: https://culturacientifica.com/2014/06/17/delmodelo-estandar," 2021.
- [18] H. Leutwyler, "On the history of the strong interaction, arxiv:1211.6777 Url: https://arxiv.org/pdf/1211.6777.pdf," 2012.
- [19] R. Staszewski, "Study of diffraction with the ATLAS detector at the LHC, CERN-THESIS-2012-409. Url: https://cds.cern.ch/record/1504372," 2013.
- [20] M. Aguilar, "Colisionadores de partículas en los grandes laboratorios de física de altas energías, Url: https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/278089," Editorial CIEMAT.1996.
- [21] CERN, "Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire. url: https://home.cern/about," 2021.
- [22] "ATLAS COLLABORATION, Technical proposal for a general-purpose pp experiment at the Large Hadron Collider, cern-lhcc-94-43."
- [23] "ATLAS COLLABORATION. ATLAS detector and physics performance : Technical Design Report, CERN-LHCC-99-014. url: https://cds.cern.ch/record/391176," 1999.
- [24] "ATLAS COLLABORATION. the ATLAS experiment at the CERN Large Hadron Collider. Journal of instrumentation, JINST 3 (2008) S08003. url: https://cds.cern.ch/record/1129811," 2008.
- [25] M. Wichmann, "Electron charge misidentification in the ATLAS detector. http://www-static.etp.physik.uni-muenchen.de/dokumente/thesis/diplomwichmann.pdf," 2008.
- [26] "ATLAS COLLABORATION. Inner Detector Technical Design Report vol. i, url: https://cds.cern.ch/record/331063," 1997.
- [27] "ATLAS COLLABORATION. Inner Detector Technical Design Report vol. ii, CERN-LHCC-97-016 url: https://cds.cern.ch/record/331063," 1997.
- [28] "ATLAS COLLABORATION. Muon Spectrometer Technical Design Report, cern-lhcc-97-022; atlas-tdr-10. url: https://cds.cern.ch/record/331068," 1997.
- [29] "ATLAS COLLABORATION, Performance of the ATLAS trigger system in 2015, Eur. Phys. J. C 77. url: arxiv: 1611.09661 [hep-ex]. 48, 49," 2015.
- [30] O.-D. M. Deile, K. Eggert, J.-M. Lacroix, S. J. Mathot, E. P. Noschis, R. Perret, E. Radermacher, and G. Ruggiero, "The Roman Pot for LHC. 562.3 p. url: https://cds.cern.ch/record/1078513," 2006.
- [31] M. Tasevsky, "Global alignment procedure for AFP in run 2." Internal note.
- [32] J. Fulachier, J. Odier, and F. Lambert, "ATLAS metadata interface (ami), a generic metadata framework, j. phys.: Conf. ser. 898 062001. url: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/898/6/062001/meta," 2017.

- [33] "ATLAS COLLABORATION. Muon reconstruction performance of the ATLAS detector in proton-proton collision data at $\sqrt{13}tev$, eur. phys. j. c 76, 292," 2016. Internal note.

Apéndices

A. Manejo de Datos

El presente trabajo de tesis tiene sus bases en la gestión y procesamiento de datos. El framework que se instalará, utiliza las herramientas típicas para realizar un análisis de muestras de datos o simuladas de Montecarlo en el formato xAOD utilizado por el Experimento ATLAS. Dicho framework se descargó de un repositorio GitLab de ATLAS y se instalará en un cluster de máquinas públicas suministradas por el departamento de tecnologías del CERN (LXPLUS). Dichas máquinas contienen las librerías de software necesarias para realizar cualquier Análisis del experimento.

La optimización y selección de los datos se realizará utilizando las corridas de datos que han sido validadas como buenas (GRL, Good run lists) correspondientes al año 2017 del llamado Run 2 del LHC. Debido al gran numero de datos recolectados es necesario contar con un gran poder de cómputo, el cual será provisto por la llamada "GRID". La red mundial de cómputo del LHC (Worldwide LHC computing GRID) tiene como objetivo proveer recursos de cómputo para el almacenamiento, distribución y análisis de los datos generados por el LHC. Se utilizara la Grid para generar las muestras reducidas con datos preseleccionados que luego se usarán para realizar la selección final.

La evaluación del alineamiento global del detector AFP con base a las mediciones realizadas de las variables ξ de los muones y el protón, se realizará con el programa Root y sus utilidades, que es la herramienta típica de análisis en física experimental de altas energías.

B. LxPLUS y GRID

El manejo de la información proporcionada por el detector se realiza a través de diversos software pertenecientes no solo a la colaboración ATLAS sino que también de forma general al CERN. La conexión remota es la principal herramienta que brindan las diversas herramientas disponibles, estas permiten no solamente tener una gran capacidad de almacenamiento, sino que también permite acceder a una poderosa capacidad de procesamiento en términos de la robusta red de computo de la cual se dispone.

La conexión con el CERN se realiza a través de LxPLUS (Linux Public Login User Service) mediante un enlace ssh, que consiste de un cluster de computadoras, aproximadamente 100, proporcionadas por el departamento de tecnología para interactuar no solo con la información propia sino también de otros usuarios. Al ingresar a LxPLUS se puede acceder a servicios de almacenamiento temporal de baja capacidad o de alta capacidad si se usa EOS, que corresponde a un sistema de archivos al cual se puede ingresar partiendo del logeo en LxPLUS.

La capacidad de almacenamiento y procesamiento se ve aumentada cuando se hace uso de la Grid. La Grid es un sistema global de cómputo que provee servicios de almacenamiento, distribución de datos generados por LHC que combina los recursos informáticos de aproximadamente 900000 núcleos de computadora de más de 170 sitios en 42 países. La grid esta organiza en cuatro niveles denominados Tier los cuales de forma separada se encargan de dar soporte en diferentes aspectos de la gestión de datos.

El Tier0 es el primer nivel, esta localizado en Ginebra y esta encargado de recopilar y reconstruir los datos que se generan directamente del LHC, creando una copia para ser almacenados de manera local y reenviando información a los centros ubicados en el Tier1. El Tier1 corresponde al segundo nivel de la Grid, en este se generan un respaldo de la información recibida al mismo tiempo que se procesa y se generan análisis, en este nivel se ubican grandes centros nacionales de investigación.El Tier2 realiza simulaciones y análisis directamente con los físicos, en este nivel se encuentran instituciones asociadas a proyectos y cabe aclarar que no existe conexión directa entre este nivel y el CERN. Por ultimo se encuentra el Tier3 que corresponde al nivel en el cual el trabajo se realiza desde computadores locales de las personas que colaboran y estas vinculadas a través de instituciones que hacen parte de la colaboración

(34).

La estructura de la Grid se puede observar en la 3.1.1.



Figura .0.1: Diagrama del sistema de Tiers, con CERN en la Tier0 enviando información a los centros del Tier1 (12).

C. Resultado del alineamiento de las Estaciones AN, CN y CF AFP

A continuación se enseña las distribuciones obtenidas luego de aplicar el alineamiento sobre las estaciones AN, CN y CF. En primer lugar en la figura 0.2 se muestra la sobre posición del background normalizado y la distribución de la señal luego de aplicar las restricciones.

Las distribuciones de la figura 0.3, muestras el resultado final de las distribuciones posición, una vez se realiza la substracción del background.

Finalmente, la figura 0.4 muestra los ajuste gaussianos realizados en las regiones de interés, de -1 a 1, para cada una de las estaciones.



Figura .0.2: Superposición de la señal y el background normalizado. La distribución superior corresponde a la estación AN. La distribución del medio corresponde a la estación CN y la distribución inferior corresponde a la estación CF



Figura .0.3: Substracción del background para las distribuciones de posición en cada una de las estaciones. La distribución superior corresponde a la estación AN. La distribución del medio corresponde a la estación CN y la distribución inferior corresponde a la estación CF



Figura .0.4: Ajustes gaussianos realizados para cada una de las estaciones. La distribución superior corresponde a la estación AN. La distribución del medio corresponde a la estación CN y la distribución inferior corresponde a la estación CF