



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

---

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

---

Simulación de RPCs en el experimento CMS-CERN

Tesis presentada al

**Colegio de Física**

como requisito parcial para la obtención del grado de

**LICENCIADA EN FÍSICA APLICADA**

por

Diana Gallardo Santacruz

Asesorada por

Dra. Cecilia Uribe Estrada

Puebla Pue.  
23 de Marzo de 2021





Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

---

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

---

Simulación de RPCs en el experimento CMS-CERN

Tesis presentada al

**Colegio de Física**

como requisito parcial para la obtención del grado de

**LICENCIADA EN FÍSICA APLICADA**

por

Diana Gallardo Santacruz

Asesorada por

Dra. Cecilia Uribe Estrada

Puebla Pue.  
23 de Marzo de 2021



**Título:** Simulación de RPCs en el experimento CMS-CERN

**Estudiante:** DIANA GALLARDO SANTACRUZ

COMITÉ

---

Dr. Guillermo Tejeda Muñoz  
Presidente

---

Dr. Alfredo Martín Castañeda Hernández  
Secretario

---

Dr. José de Jesús Toscano Chávez  
Vocal

---

Dr Gerardo Francisco Torres del Castillo  
Vocal

---

Dra. Cecilia Uribe Estrada  
Asesor



# Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a mis padres porque gracias a su amor e incondicional apoyo todo esto ha sido posible, a todas las personas que estuvieron conmigo y a quien ya no está.

Deseo expresar mi enorme agradecimiento a mi asesora, la Dra. Cecilia Uribe Estrada, por su incondicional apoyo y valiosa guía en este trabajo; a Manuel Alejandro Del Río Viera, por su importante contribución a esta tesis, por su admirable paciencia y capacidad de transmitir conocimiento. También agradezco al Dr. Alfredo Martín Castañeda Hernández por su valiosa aportación con los flujos de energía de background generados con el paquete FLUKA, tomando en cuenta las condiciones del Experimento CMS.

Este trabajo fue apoyado con el proyecto No. A1-S-39980, CB-2017-2018, por lo que se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).



# Resumen

El nombre del Experimento CMS (Compact Muon Solenoid) pone de manifiesto la importancia del detector de muones en la búsqueda de nueva física. Este detector se compone de tres sub-detectores incluyendo las RPCs (Resistive Plate Chambers), que son detectores gaseosos que combinan una buena resolución espacial y temporal, idóneos para los sistemas de rastreo (tracking) y disparo (trigger) para la identificación de muones.

En vista de la fase de alta luminosidad del Large Hadron Collider (HL-LHC), se espera un incremento en la luminosidad por un factor de 10 ( $10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) comparado con el valor de diseño del LHC ( $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), con este aumento, también se incrementarán los procesos de background o ruido de fondo. Por tanto, para garantizar el buen funcionamiento de los detectores es importante estudiar y entender la radiación de background y su impacto sobre los mismos.

En esta tesis se presenta un estudio de simulación de Monte Carlo de los efectos de radiación sobre el detector RE1/1 en CMS. Este detector es simulado de forma detallada en Geant4. Los flujos de radiación se han obtenido a través de CMS y son generados con FLUKA. Utilizando Geant4 se calcula la sensibilidad del RE1/1 a diferentes tipos de radiación y, finalmente, haciendo la convolución de la sensibilidad del detector con los flujos de energía, se calcula el Hit Rate.

**Palabras claves:** Resistive Plate Chambers, Monte Carlo, Geant4, Sensibilidad, Radiación de fondo, Hit Rate.



# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>v</b>
<b>Resumen</b>	<b>vii</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Las partículas elementales y el modelo estándar . . . . .	2
1.2. Interacciones fundamentales . . . . .	2
1.3. El modelo estándar de partículas elementales . . . . .	3
<b>2. Detectores Gaseosos</b>	<b>5</b>
2.1. Interacción de radiación con la materia . . . . .	5
2.1.1. Pérdida de energía debida a excitación e ionización . . . . .	6
2.1.2. Emisión Bremsstrahlung . . . . .	6
2.1.3. Efecto Compton . . . . .	7
2.1.4. Efecto fotoeléctrico . . . . .	7
2.1.5. Producción de Pares . . . . .	8
2.2. Resistive Plate Chambers, RPCs . . . . .	8
2.3. Algunas aplicaciones de las RPCs . . . . .	9
<b>3. La física de las RPCs</b>	<b>11</b>
3.1. Avalancha de Townsend . . . . .	11
3.2. Formación de la señal . . . . .	11
3.3. Carga espacial . . . . .	12
3.4. Modo Avalancha . . . . .	12
3.5. Modo Streamer . . . . .	13
<b>4. Compact Muon Solenoid CMS</b>	<b>15</b>
4.1. El sistema de coordenadas . . . . .	16
4.2. Subdetectores de CMS . . . . .	16
4.2.1. Imán superconductor . . . . .	16
4.2.2. Sistema de rastreo interno . . . . .	17
4.2.3. Calorímetro electromagnético (ECAL) . . . . .	17
4.2.4. Calorímetro Hadrónico (HCAL) . . . . .	18
4.2.5. El sistema de Muones . . . . .	18
4.3. RPCs de CMS . . . . .	20
4.3.1. Readout Strips . . . . .	20
4.3.2. Algoritmo de disparo . . . . .	21

4.4. Mejoras en CMS y los nuevos iRPC . . . . .	22
<b>5. Simulaciones</b>	<b>25</b>
5.1. Simulaciones de RPCs en Geant4 . . . . .	26
5.2. Visualización de la simulación . . . . .	27
<b>6. Resultados</b>	<b>29</b>
6.1. Sensitivity . . . . .	29
6.2. Particle flux . . . . .	31
6.3. Hit Rate . . . . .	33
<b>7. Conclusiones</b>	<b>39</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>41</b>

# Capítulo 1

## Introducción

El objetivo principal de la física de partículas es entender de manera fundamental el universo que nos rodea. Para ello se plantea preguntas como: ¿cuáles son los bloques fundamentales del universo y las leyes que los rigen?, ¿cuál es el origen de nuestro universo?, ¿qué es la materia y energía oscura?, ¿existen dimensiones extra? Estas y muchas otras preguntas son lo que sustenta la motivación y el desarrollo de la física de partículas.

En el proceso de responder algunas de estas preguntas fundamentales, la física de partículas ha desarrollado tecnologías de punta aplicables a diferentes áreas. En medicina, algunos ejemplos incluyen: tomografía computarizada, tomografía por emisión de positrones (PET) y resonancia magnética (MRI-LINAC).

Irónicamente, mientras más pequeño sea el objeto de estudio, en este caso, las partículas elementales, se requieren aparatos más grandes y complejos para poder analizar su comportamiento. Fundado en 1954 y ubicado en Suiza cerca de Ginebra, el Consejo Europeo para la Investigación Nuclear (Conseil européen pour la recherche nucléaire, CERN) está compuesto de un conjunto de aceleradores de partículas entre los que se destaca el LHC (Large Hadron Collider), que es un acelerador de partículas de 27 km de circunferencia con una energía de diseño de colisión de 14 TeV.

En su periferia, el LHC tiene subestaciones con varios experimentos, los dos más grandes son llamados: CMS (Compact Muon Solenoid) y ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus). Una de las metas principales de CMS y ATLAS incluía la búsqueda del bósón de Higgs, el cual fue reportado por ambos experimentos el 4 de julio de 2012. Gracias a ello, el Premio Nobel en Física de 2013 fue otorgado a Peter Higgs y François Englert por sus aportaciones a la teoría de este bosón. En la actualidad el LHC y sus experimentos se encuentran en una fase de mejoras para prepararse para la siguiente corrida (Run-3) y con miras también a la fase-2 de alta luminosidad denotada como HL-LHC (High-Luminosity Large Hadron Collider), la cual se espera comience después de 2027.

El experimento CMS incluye en su nombre una de las partículas más importantes para la búsqueda de nueva física: el muón. Este tiene una masa cerca de 207 veces mayor que la del electrón, un tiempo de vida de alrededor de dos millonésimas de segundo y es una partícula inestable. La importancia de los muones se enfatizó con el descubrimiento del bosón de Higgs, ya que los productos finales del decaimiento principal incluyen cuatro leptones, entre ellos el muón.

El sistema de detección de muones en CMS incluye los detectores llamados Resistive Plate Chambers (RPCs). Estos son detectores gaseosos de placas paralelas que registran

una señal eléctrica cada vez que un muón pasa através de ellos.

Varios estudios han demostrado que las RPCs, así como otros detectores en el LHC, trabajan en ambientes hostiles de radiación constituidos principalmente por rayos gamma y neutrones. Para entender cómo esta radiación puede afectar la funcionalidad de los detectores, necesitamos saber su sensibilidad a estos tipos de radiación. Haciendo uso de Geant4 y otros programas de simulación como FLUKA, se pueden simular los diferentes tipos de radiación (neutrones, fotones, electrones, positrones) a los que los detectores están expuestos, así como la geometría de las RPCs en gran detalle.

A través de la simulación, se puede estudiar el paso de estas partículas por los detectores y medir diferentes variables de interés, en este caso, las curvas de sensibilidad vs energía que provienen de estas simulaciones, indican la respuesta de las RPCs a los diferentes tipos de radiación.

## 1.1. Las partículas elementales y el modelo estándar

En un inicio, el término partícula elemental se usó para toda partícula subatómica como los protones, neutrones, electrones y otro tipo de partículas exóticas que solo pueden encontrarse en los rayos cósmicos o en los grandes aceleradores de partículas, como los piones o los muones. Sin embargo, a partir de los años 1970 quedó claro que los protones y neutrones son partículas compuestas de otras más simples. Actualmente el nombre de partícula elemental se usa para las partículas que, hasta donde se sabe, no están formadas por partículas más simples, por ejemplo los quarks y electrones. El protón y neutrón no son fundamentales, ya que están compuestos de quarks y gluones (los portadores de la fuerza fuerte). Todas las partículas constituidas por quarks se conocen como hadrones y estos incluyen los mesones y bariones. El átomo se puede formar con sólo dos tipos de quarks (el up y down) y el electrón. Así con dos quarks up y un quark down formamos el protón y con dos quarks down y un up se forma el neutrón. La combinación de electrones, protones y neutrones nos permite formar los diferentes elementos de la tabla periódica, considerando también los neutrinos tendríamos todas las partículas materiales del universo. Sorprendentemente la astronomía indica que esta materia conocida y “observable” sólo representa el 5 %, se cree que la materia oscura representa el 25 % y la energía oscura el 70 % del universo.

## 1.2. Interacciones fundamentales

Las interacciones fundamentales describen cómo se comporta la materia de escalas subatómicas a cosmológicas. En la naturaleza existen cuatro tipos de interacciones fundamentales: gravitacional, electromagnética, fuerte y débil. La gravitacional es la más débil, pero su rango es infinito, así como el de la fuerza electromagnética, esta es mucho más fuerte que la gravitacional. La débil y la fuerte son dominantes solamente a nivel microscópico y actúan a distancias muy pequeñas; cada una de las fuerzas es debida a una propiedad fundamental de la materia: masa (gravitacional), carga eléctrica (electromagnética), carga color (fuerte) y carga débil (débil); y cada una de ellas es transmitida por distintas partículas elementales (figura 1.1) [1].

## Interacciones fundamentales

ELCTROMAGNÉTICA	FUERTE	DÉBIL	GRAVITACIONAL
DEBIDA A	DEBIDA A	DEBIDA A	DEBIDA A
CARGA ELÉCTRICA	COLOR	CARGA DÉBIL	MASA
QUE CREA	QUE CREA	QUE CREA	QUE CREA
CAMPO ELECTROMAGNETICO	CAMPO FUERTE	CAMPO DÉBIL	CAMPO GRAVITACIONAL
QUE EJERCE	QUE EJERCE	QUE EJERCE	QUE EJERCE
FUERZA ELECTROMAGNETICA	FUERZA FUERTE	FUERZA DÉBIL	FUERZA GRAVITACIONAL
TRANSMITIDA POR	TRANSMITIDA POR	TRANSMITIDA POR	TRANSMITIDA POR
FOTONES	GLUONES	PARTÍCULAS W Y Z	GRAVITONES (NO OBSERVADOS)

Figura 1.1: Esquema simplificado de las interacciones fundamentales. El gravitón es una partícula predicha teóricamente, sin embargo, actualmente no se ha detectado en algún arreglo experimental.

### 1.3. El modelo estándar de partículas elementales

*El Modelo Estándar (MS) es, en la historia, la más sofisticada teoría matemática sobre la naturaleza. A pesar de la palabra “modelo” en su nombre, el MS es una teoría comprensiva que identifica las partículas básicas y especifica cómo interactúan. Todo lo que pasa en nuestro mundo (excepto los efectos de la gravedad) es resultado de las partículas del MS interactuando de acuerdo con sus reglas y ecuaciones [2].*

Esta teoría clasifica las partículas elementales de acuerdo con sus respectivas cargas y describe cómo interactúan a través de las interacciones fundamentales. En este contexto, una carga es una propiedad de una partícula elemental que define la interacción fundamental por la que es influenciada. Posteriormente, se dice que la partícula de interacción correspondiente “se acopla” a una determinada carga. Por ejemplo, los gluones, las partículas portadoras de la interacción fuerte, se acoplan a partículas con carga de color (figura 1.1). De las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza, todas excepto la gravedad están descritas por el modelo estándar de física de partículas: las partículas con carga eléctrica están influenciadas por la interacción electromagnética, las partículas con carga débil están influenciadas por la interacción débil, y aquellas con una carga de color están influenciados por la interacción fuerte [3].

Las interacciones están mediadas por sus respectivas partículas de interacción: fotones ( $\gamma$ ) para la interacción electromagnética, los bosones débiles ( $W^-$ ,  $W^+$  y  $Z^0$ ) para la interacción débil y gluones ( $g$ ) para la interacción fuerte. Además, una partícula elemental puede verse influenciada por más de una interacción fundamental, en cuyo caso tiene varias cargas (figura 1.2). Por ejemplo, debido a sus cargas eléctricas y débiles, un muón está influenciado tanto

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

### 1.3. EL MODELO ESTÁNDAR DE PARTÍCULAS ELEMENTALES

por la interacción electromagnética como por la interacción débil [3].

En 2012, fue descubierto un nuevo tipo de bosón, “El bosón de Higgs”, que propone la explicación del origen de la masa de las partículas elementales. El modelo electrodébil es una teoría que unifica la fuerza electromagnética y la débil en la llamada interacción electrodébil. Aunque existen modelos, como el llamado GUT (Grand Unification Theory), que predicen que a altas energías debe haber una unificación de las tres fuerzas fundamentales del MS (fuerte, débil y electromagnética), aún no existe evidencia experimental de esta nueva fuerza.

El MS, abarca 17 tipos de partículas elementales, las cuales están compuestas por seis leptones (electrón, muón, tau, neutrino del electrón, neutrino del muón y neutrino del tau) y seis quarks [quark up (u) quark down (d), quark charm (c), quark strange (s), quark bottom (b) y quark top (t)]. Los quarks tienen una propiedad llamada color (dicha propiedad no está asociada con los colores reales) y cada uno puede presentar tres colores (rojo, verde y azul). Hay, por tanto, 18 quarks (figura 1.2). A cada una de las partículas anteriores le corresponde una antipartícula, por lo tanto, existen en total 12 leptones y 36 quarks [4, 5].

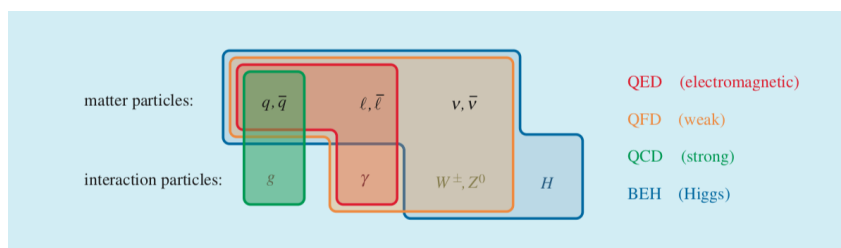


Figura 1.2: Las partículas son divididas en tres grupos: quarks ( $q$ ) y antiquarks ( $q^-$ ); leptones cargados eléctricamente ( $l$ ) y antileptones ( $l^-$ ); neutrinos ( $\nu$ ) y antineutrinos ( $\nu^-$ ). Gluones ( $g$ ) acoplados a la carga de color, la cual sólo poseen los quarks, antiquarks y gluones. Los fotones ( $\gamma$ ) acoplados a la carga eléctrica que se encuentra en los quarks, antiquarks y los leptones y antileptones eléctricamente cargados. Los bosones débiles ( $W^+, W^-, Z^0$ ) acoplados a la carga débil, la cual tienen tanto los leptones como los quarks. Los bosones débiles también interactúan con el fotón. Finalmente, el campo Brout-Englert-Higgs interactúa con las partículas que tienen masa, que son todas menos el gluón y el fotón [3].

El buen funcionamiento de los detectores en los experimentos de altas energías, juega un papel crucial en la detección de las partículas y en la posibilidad de nuevos descubrimientos. El aumento de la luminosidad en el LHC incrementará la posibilidad de detección de nuevos fenómenos, pero también incrementará la radiación de fondo (background) a la que estarán sometidos los detectores. Por ello es importante determinar los efectos que esta radiación puede tener sobre el desempeño de los mismos.

En esta tesis se presenta un estudio de simulación de Monte Carlo de los efectos de radiación sobre los detectores Resistive Plate Chambers (RPCs) en el Experimento CMS. Estos estudios son importantes ya que pueden ayudar en el diseño de detectores más robustos que puedan soportar ambientes hostiles de radiación. Así mismo pueden aportar información valiosa para crear un mejor blindaje que proteja los detectores y la electrónica para su mejor funcionamiento.

En los siguientes capítulos se presenta una breve descripción del experimento CMS, seguido del funcionamiento de los detectores gaseosos, particularmente de las RPCs de CMS. Posteriormente se presentan los resultados correspondientes a la simulación que incluyen la sensibilidad del detector, los flujos dentro del espectrómetro y el Hit Rate.

## Capítulo 2

# Detectores Gaseosos

A través de su paso por algún material, cualquier tipo de partícula cargada interactúa con éste depositando parte de su energía y, dependiendo del tipo de interacción es el tipo de detector que se necesita para realizar su estudio. De acuerdo a su funcionamiento, existen diferentes tipos de detectores de partículas, por ejemplo, detectores de centelleo, de ionización y de rastreo. Debido a la naturaleza de esta tesis, nos enfocaremos especialmente en los detectores gaseosos.

Los detectores gaseosos captan los electrones emitidos al ionizar un gas determinado, los cuales son acelerados por una diferencia de potencial, mismos que a su vez generan una mayor ionización produciendo una avalancha de electrones, amplificando la señal detectada por cada uno de los electrodos. Debido a que la geometría de estos detectores es una característica independiente al funcionamiento del detector, éstos pueden ser planos, cilíndricos o esféricos. Los primeros detectores gaseosos fueron la Cámara de Ionización, el Contador Proporcional y el detector Geiger-Müller [6].

Los detectores de partículas permiten el estudio de distintas cantidades físicas importantes como la masa, energía, momento, carga y flujo, con esas cantidades “básicas” se puede obtener información más compleja y completa como son el momento transversal, la pseudo-rapidez, polarización, etc. Una de esas características es la sensibilidad, que se conoce como la capacidad que tiene un detector para producir una señal medible. La sensibilidad depende de la sección eficaz de las reacciones ionizantes, la masa, el ruido, el material, la energía de la partícula y de la geometría del detector [6].

### 2.1. Interacción de radiación con la materia

Las partículas identificadas dentro de cualquier detector, pierden energía a medida que interactúan con un material, ya sea gas, líquido o sólido. Cuando se tiene la existencia de partículas cargadas eléctricamente, y chocan con electrones atómicos del material, se pierde energía por ionización o excitación, a su vez, cuando los núcleos se dispersan, se pierde por medio de radiación bremsstrahlung.

Si bien, los fenómenos de radiación de transición y radiación Čerenkov no son tan relevantes, son procesos importantes en la identificación de partículas cargadas. Además, se reitera que los fotones interactúan con la materia mediante el efecto fotoeléctrico (importante para valores de energías de 10 MeV), el efecto Compton (importante para rangos de

## CAPÍTULO 2. DETECTORES GASEOSOS

### 2.1. INTERACCIÓN DE RADIACIÓN CON LA MATERIA

---

energías de fotones de 100 eV a 1 GeV) y la producción de pares (para energías de alrededor de 100 MeV), así, los fotones pierden energía por medio del efecto Compton con electrones atómicos o bien a través de procesos como el efecto fotoeléctrico y la producción de pares [7].

Para hacer un buen estudio de partículas subatómicas, los detectores de partículas deben ser capaces de medir la presencia y en su caso la trayectoria de 8 partículas y sus correspondientes antipartículas: electrones, muones, protones, neutrones, fotones, piones cargados, kaones cargados y kaones neutros. Dichas partículas dejan rastros característicos debido a su pérdida de energía al atravesar un medio de detección, ya sea gas, líquido o sólido. Esta pérdida de energía se presenta de diferentes formas:

- Las partículas cargadas pierden energía al chocar con los electrones atómicos del material, es decir, por excitación, ionización y por la emisión de Bremsstrahlung cuando se dispersan fuera de los núcleos [7].
- Los fotones pierden energía al dispersarse debido al efecto Compton con los electrones atómicos o desaparecen completamente gracias al efecto fotoeléctrico y producción de pares [7].

La pérdida de energía debido a la ionización y excitación es el principal fenómeno para la mayoría de los detectores de partículas, incluyendo las RPCs y por lo tanto, en esta sección se presentan brevemente estas formas de interacción de partículas cargadas eléctricamente con la materia.

#### 2.1.1. Pérdida de energía debida a excitación e ionización

Toda partícula cargada eléctricamente perderá parte de su energía al atravesar un medio e interactuar con los átomos de este y dependerá de la energía de interacción entre la partícula incidente y el electrón del átomo, es decir, si la energía transferida es mayor que la energía de enlace del electrón colisionado, este abandonará al átomo y se creará un ión positivo. Este proceso es la ionización. La ionización originada por la transferencia de energía de la partícula cargada a los electrones atómicos, se le conoce como ionización primaria. En otro caso, cuando la ionización es generada por electrones producidos en la ionización primaria y cuya energía sea suficiente para producir nuevas ionizaciones recibe el nombre de ionización secundaria.

La ionización total producida por una partícula cargada a su paso a través del medio, es igual al número total de pares ión-electrón producidos por ionización primaria y secundaria a lo largo de su trayectoria.

De manera contraria, si la energía transferida no es suficiente para arrancar al electrón de su átomo, este será promovido a una órbita de mayor energía, produciendo radiación electromagnética, excitando al átomo [6].

#### 2.1.2. Emisión Bremsstrahlung

La radiación de frenado o de Bremsstrahlung se genera cuando una partícula cargada se ve atraída hacia un núcleo desviándose de su trayectoria original, experimenta la acción de una fuerza eléctrica y por lo tanto una aceleración, ocasionando que parte de su energía cinética sea emitida en forma de radiación electromagnética (figura 2.1).

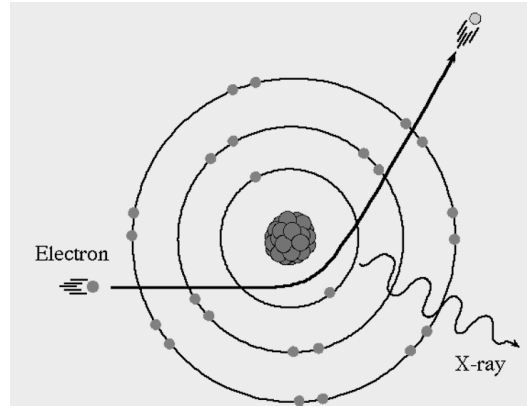
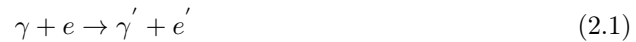


Figura 2.1: Radiación de frenado.

### 2.1.3. Efecto Compton

El efecto Compton tiene lugar cuando un fotón altamente energético colisiona con un electrón cuya energía de enlace es muy pequeña que se puede considerar como un electrón libre y tomándose como una colisión elástica, el electrón absorberá parte de la energía y momento del fotón incidente siendo dispersado a cierto ángulo mientras que el fotón es dispersado en otra dirección (figura 2.2) [6].



### 2.1.4. Efecto fotoeléctrico

Consideremos la colisión entre un fotón y un átomo. Si la energía del fotón incidente es del orden de la energía de enlace del electrón, este absorbe al fotón y escapa del átomo (figura 2.2).



Se consideran dos factores para la producción de foto-electrones, primero, para cada tipo de sustancia hay una frecuencia mínima o de umbral (la energía de ligadura del electrón de determinado átomo) de la radiación electromagnética por debajo de la cual no se producen foto-electrones y que la emisión electrónica aumenta cuando se incrementa la intensidad de la radiación que incide sobre la superficie del material ya que hay más energía para liberar electrones. Suponiendo que cada electrón absorbe un cuanto de radiación o fotón, con energía

$$E_\gamma = h\nu \quad (2.3)$$

donde  $h$  es la constante de Planck,  $\nu$  es la frecuencia de radiación electromagnética y  $E_\Phi$  la energía mínima necesaria para producir foto-electrones, se tienen dos casos [6]:

- Si  $E_\gamma < E_\Phi$ : no hay efecto fotoeléctrico.
- Si  $E_\gamma \geq E_\Phi$ : habrá emisión de foto-electrones y la energía cinética del electrón dispersado será

$$E_k = E_\gamma - E_\Phi \quad (2.4)$$

### 2.1.5. Producción de Pares

Un fotón interactúa con el campo electromagnético del núcleo, creando un par electrón-positrón (ver figura 2.2). Ya que la masa en reposo del electrón es equivalente a 0.51 MeV, se requiere de una energía mínima de 1.02 MeV para crear el par de cargas. Este proceso se ve favorecido por el aumento en la energía del fotón incidente y el número atómico (figura 2.2).

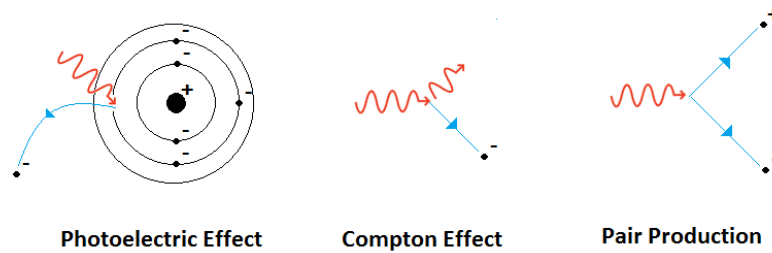


Figura 2.2: Esquema del efecto Compton, efecto fotoeléctrico y producción de pares.

## 2.2. Resistive Plate Chambers, RPCs

Debido a la buena movilidad de los iones y electrones, un gas es el medio ideal para la producción de radiación ionizante, por lo que en física de partículas, los detectores gaseosos, como las Cámaras de Placas Resistivas o RPCs, son de gran utilidad al trabajar con radiación.

Desarrollados en 1981 por R. Santónico y R. Cardarelli, las RPCs son detectores de ionización gaseosos cuyo principal objetivo era crear una buena alternativa para los detectores de centelleo, pues al final, debido a su bajo costo, alta eficiencia y excelente resolución temporal, son los detectores de partículas más usados [7].

Una RPC consta de dos placas resistivas paralelas de cierto espesor separadas por un espacio lleno de gas, a las cuales se les aplica un voltaje a través de los electrodos mediante una capa de pintura de grafito en la superficie interior (figura 2.3). En la parte exterior de los electrodos, se ubican unas tiras de lectura (*readout strips*) cuya función es recoger por inducción la señal producida por el movimiento de partículas cargadas creadas al cruzar por el gas. El material resistivo de los electrodos puede cambiar de acuerdo a las necesidades del detector, siendo los más habituales la baquelita y el cristal.

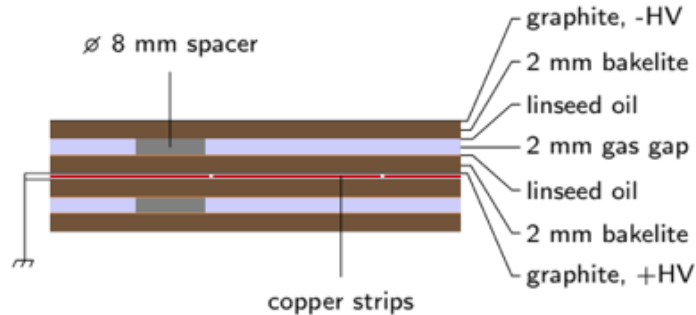


Figura 2.3: Sección transversal de una RPC [8].

### 2.3. Algunas aplicaciones de las RPCs

Algunas ventajas de las RPCs son el tiempo de respuesta rápido y su bajo costo de producción, por lo tanto, las RPCs son utilizadas para proporcionar señales de activación y temporización, mientras que la información espacial que obtienen se complementa con detectores más precisos. Sin embargo, se ha visto que la resolución espacial puede ser mejorada con un diseño específico de RPCs, este cambio sugiere que estos detectores pueden usarse en una serie de aplicaciones donde los requisitos en la posición de interacción de partículas no son demasiado estrictos.

Gracias a la versatilidad de las RPCs, además de su aplicación en la física de altas energías en diversos experimentos alrededor del mundo incluyendo los del LHC, estos detectores se pueden emplear en distintas áreas. Un ejemplo de tal aplicación es la tomografía de dispersión de muones (MST), en la cual los muones provenientes de los rayos cósmicos se rastrean antes y después de penetrar un volumen. Posteriormente, al analizar la distribución de los ángulos de dispersión, es posible crear un mapa de densidad de los materiales contenidos en dicho volumen y sondear la presencia de materiales con un alto número atómico ( $Z$ ), como materiales nucleares especiales.

Otra aplicación es la radiografía de volcanes con la que se puede hacer una medida de la distribución de densidad dentro de un objetivo geológico mediante la reconstrucción de pistas de muones cósmicos que pasaron a través de éste. Si se compara el flujo de muones desde la dirección de incidencia (que puede obtenerse a partir de la simulación o medirse en el sitio), se puede entonces derivar, a partir de la disminución del flujo de muones una estimación de la densidad del objetivo [7].

También se han empleado detectores de partículas en túneles ferroviarios para investigar la geometría de la roca madre debajo de los glaciares activos en la región de Jungfrau en Suiza. Además, se han desarrollado aplicaciones para la muografía en el monitoreo de residuos nucleares, arqueología y seguridad nacional. Ejemplos de esto último incluyen otros dos productos derivados de CMS, estos son los Drift Tubes y los detectores GEM (Gas Electron Multiplier) [9].



## Capítulo 3

# La física de las RPCs

En esta tesis, debido a las simulaciones realizadas para las RPCs, se describe con mayor detalle la composición y funcionamiento de estos detectores.

El proceso de ionización genera solamente pocos pares electrón-ión por milímetro de gas, en cambio, al hacer una completa recolección directamente en un electrodo de salida, la corriente será muy pequeña, por lo tanto, para obtener una señal útil, estos pares necesitan ser multiplicados, lo que requiere altos campos eléctricos donde la energía del electrón sea suficiente para producir una cadena de colisiones inelásticas que generen la multiplicación deseada de estos pares. Las RPCs tienen dos modos de funcionamiento: Modo avalancha y Modo Streamer. En esta sección abordaremos una breve explicación de los principales procesos físicos que tienen lugar dentro de las RPCs.

### 3.1. Avalancha de Townsend

La Avalancha de Townsend (figura 3.1) es un efecto en cascada que se produce en un medio gaseoso al ser ionizado, esto sucede cuando electrones libres son acelerados por la existencia de un campo eléctrico suficientemente fuerte, generando ionización por impacto. A partir de la primera molécula ionizada por la radiación ionizante, se produce un par de iones, el positivo se acelera hacia el cátodo, mientras que el electrón libre continúa hacia el ánodo. Cuando el campo eléctrico es bastante fuerte, el electrón libre obtiene energía suficiente y es capaz de liberar otro electrón al colisionar con otra molécula. Los dos electrones libres siguen hacia el ánodo y obtienen energía suficiente del campo eléctrico para provocar una nueva ionización por impacto y continúa mientras los electrones libres tengan energía suficiente para sostener la reacción en cadena generada por las colisiones entre moléculas.

### 3.2. Formación de la señal

A medida que la carga se acerca (o se aleja) de los electrodos, se induce una señal de lectura. La cantidad de corriente inducida producida por estas cargas en movimiento viene dada por el teorema de Ramo, este se refiere a señales inducidas en conductores conectados a tierra debido a cargas en movimiento en el espacio entre los conductores y viene dado por la siguiente ecuación:

### Visualización de una Descarga de Townsend

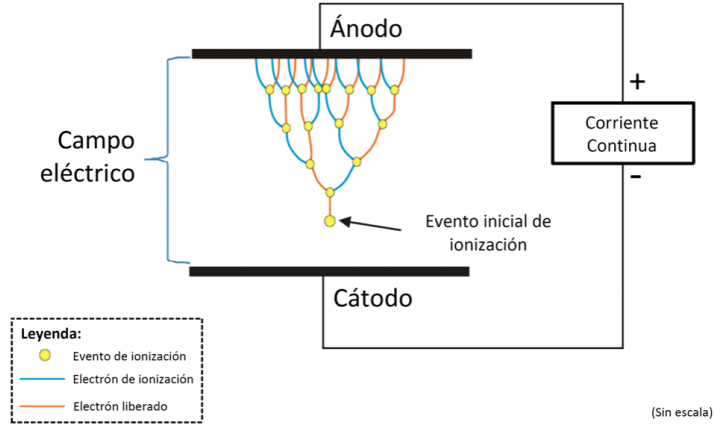


Figura 3.1: Visualización de una avalancha de Townsend. El campo eléctrico aplicado acelera los electrones libres para colisionar con otros átomos y liberar más electrones, provocando una avalancha [7].

$$i_{ind}(t) = qN(t)\nu_d \cdot \mathbf{E}_w(\mathbf{x}(t)) \quad (3.1)$$

donde  $q$  es la carga de la partícula,  $N$  es el número de partículas en el cluster,  $\nu_d$  la velocidad de deriva y  $\mathbf{E}_w$  es el campo de ponderación en  $x$  en el tiempo  $t$ . El campo de ponderación es una consecuencia del potencial de ponderación y no es una cantidad medible, a diferencia del campo eléctrico [10].

### 3.3. Carga espacial

Cuando una partícula cargada entra en el espacio, crea un camino de ionización que puede desencadenar un proceso de avalancha. La avalancha consta de dos partes, una cabeza de electrones de movimiento rápido y una cola de iones positivos lentos. A medida que la cantidad de partículas crece lo suficiente, su presencia puede alterar el campo eléctrico en su entorno afectando la velocidad de deriva y el coeficiente de Townsend efectivo, distorsionando consecuentemente el campo uniforme a través del espacio, a esto se le conoce como carga espacial.

La carga espacial tiene dos consecuencias principales: el cambio de la ganancia de gas local a su alrededor y el aumento de la aparición de *streamers* [10].

### 3.4. Modo Avalancha

El modo avalancha se genera al paso de una partícula cargada a través del detector e interactúa con los átomos de la mezcla de gas, generando ionización que a su vez libera electrones debido al alto campo eléctrico, a continuación, se produce una avalancha de Townsend. Las placas de vidrio o baquelita al tener una alta resistividad funcionan como

placas dieléctricas que facilitan la detección de señales producida por el movimiento de electrones en las avalanchas del gas [6].

La multiplicación en los detectores de gas, ocurre cuando los primeros electrones de ionización ganan suficiente energía debida al campo eléctrico acelerado para posteriormente ionizar las moléculas de gas. Los electrones secundarios resultantes entonces producen una tercera ionización y así consecutivamente, esto resulta en la formación de una avalancha. Así, cuando un muón pasa a través de estas placas, este ioniza los átomos del gas creando esta avalancha de Townsend (figura 3.2) [11].

La diferencia de potencial inducida en los electrodos de placas paralelas, conducen a un campo eléctrico uniforme en el área del gas. Los electrodos son vulnerables a la señal emitida por los electrones que son recogidos por tiras metálicas externas, posteriormente, el patrón de hits en las tiras metálicas proporciona una medida rápida del impulso de muones que es enviado al *trigger* para que así se decida si los datos obtenidos se conservan o no.

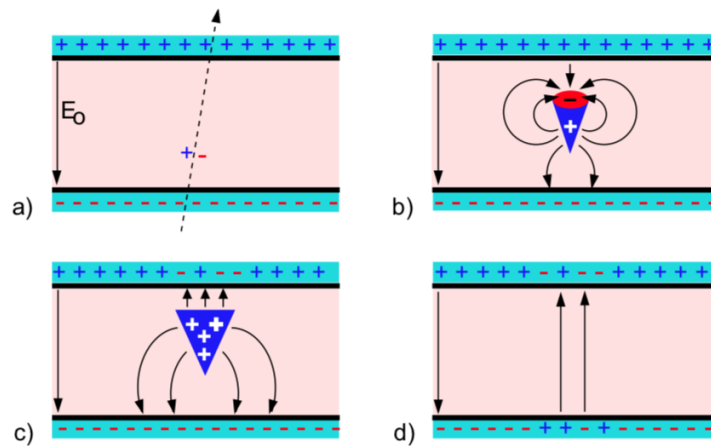


Figura 3.2: Imagen esquemática del desarrollo de una avalancha de Townsend en una RPC y las deformaciones del campo eléctrico causadas por ésta.  $E_0$  es el campo inicialmente inducido. a) Algunos átomos de gas se ionizan por el paso de una partícula cargada. Se inicia una avalancha. b) El tamaño de la avalancha es lo suficientemente grande como para influir en el campo eléctrico en el espacio del gas. c) Los electrones alcanzan el ánodo. Los iones se desplazan mucho más despacio. d) Los iones alcanzan el cátodo. Las cargas en las capas resistivas influyen en el campo en un área pequeña alrededor de la posición donde se desarrolló la avalancha [7].

### 3.5. Modo Streamer

Similarmente al Modo Avalancha, en el Modo Streamer se genera una avalancha de electrones, pero cuando la ganancia del gas es muy alta, los fotones producidos contribuyen a la propagación de ésta, entonces, las avalanchas se convierten en streamers (figura 3.3). Los streamers se generan cuando la ionización de la cámara produce tantas ionizaciones secundarias que se produce una descarga muy alta en el detector, esto es, una corriente entre las placas paralelas. La contribución de los fotones hace que la velocidad de los streamers sea

mayor que la velocidad de la avalancha [6].

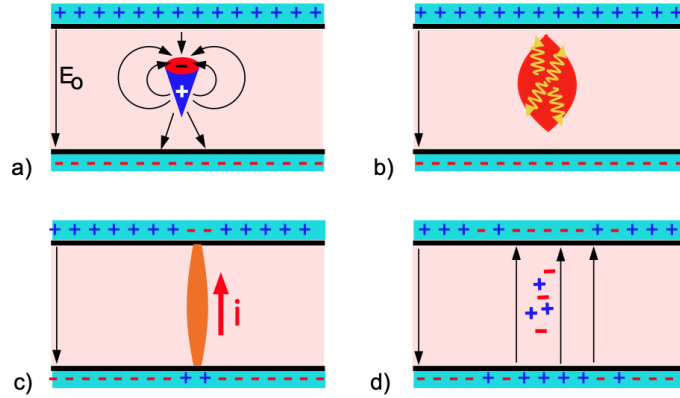


Figura 3.3: Vista esquemática del desarrollo de un streamer en una RPC. a) Se está desarrollando una avalancha como en la figura 3.1. b) Las cargas de avalancha conducen a una alta distorsión del campo en el espacio de gas. Además, los fotones comienzan a contribuir al desarrollo de la avalancha y provocan una rápida propagación de esta: un streamer evoluciona. c) Puede crearse una chispa débil. Se descarga el área del electrodo local. d) El campo eléctrico está fuertemente disminuido alrededor del lugar de la avalancha [7].

## Capítulo 4

# Compact Muon Solenoid CMS

El Compact Muon Solenoid (CMS) es un detector de propósito general en el LHC, sus objetivos incluyen estudiar la física del MS (incluido el bosón de Higgs) y física más allá de este, como la búsqueda de dimensiones extra y partículas nuevas que podrían conformar la materia oscura; esto se logra estudiando colisiones protón-protón a una energía del centro de masa de 14 TeV (energía nominal de diseño). Una representación del espectrómetro de CMS se presenta en la figura 4.1. El CMS está construido alrededor de un solenoide superconductor que genera un campo magnético de 4 Teslas; este solenoide rodea al strip tracker y al silicón tracker, un calorímetro electromagnético de cristales de centelleo de tungstato de plomo y un calorímetro hadrónico de muestreo centelleante. El detector completo tiene 21 m de largo, 15 m de ancho, 15 m de alto y pesa 14,000 toneladas.

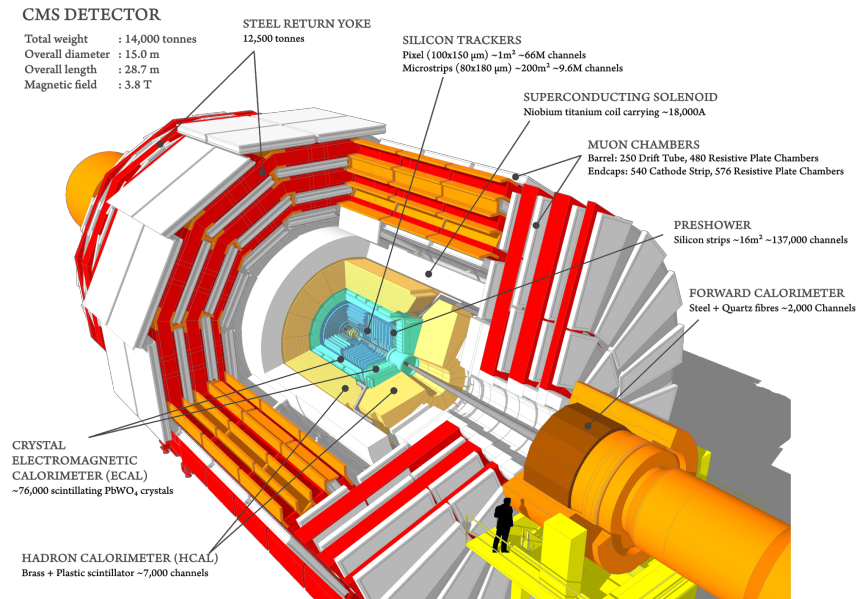


Figura 4.1: Vista esquemática del CMS (imagen: CERN)

## 4.1. El sistema de coordenadas

El sistema de coordenadas global de CMS tiene su origen en el punto de interacción (IP). Se utiliza un sistema de coordenadas diestro con el eje X apuntando hacia el centro del anillo LHC, el eje Y apuntando hacia arriba y el eje Z a lo largo del tubo por donde pasa el haz de protones. Debido a que el LHC proporciona colisiones de hadrones, la diferente fracción de energía del partón conduce a una energía total desconocida. En consecuencia, uno está principalmente interesado en los componentes transversales de la energía total y faltante. Esta misma característica también conduce a un centro de masa potencialmente aumentado longitudinalmente. Como consecuencia, se utilizan cantidades invariables bajo tales potenciadores, como el momento transversal  $p_T$ . A lo largo del tubo del haz, la dirección Z, la diferencia en pseudorapidez entre dos partículas es aproximadamente invariable bajo tal impulso para partículas ultra-relativistas. Aquí,  $\theta$  es el ángulo polar entre el momento de la partícula y el eje Z. Se acompaña del ángulo acimutal  $\phi$ , con el eje X en  $\phi = 0$ , para formar un sistema de coordenadas esféricas [12].

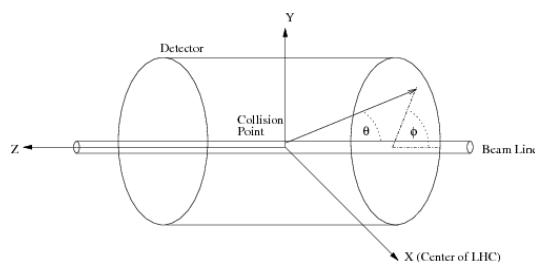


Figura 4.2: Sistema de coordenadas de CMS

## 4.2. Subdetectores de CMS

Al igual que una cámara gigante, el CMS captura en todas direcciones colisiones de partículas hasta 40 millones de veces por segundo. Si bien, las partículas producidas en cada colisión son “inestables”, decaen rápidamente a partículas estables que el CMS pueda detectar, posteriormente, se miden sus momentos y energías para finalmente reunir toda la información de estas partículas y recrear una “imagen” de la colisión. Las principales características distintivas de CMS son un solenoide de alto campo, un sistema de rastreo interno (*the inner tracker system*), un calorímetro electromagnético (ECAL) homogéneo construido con cristal centellador, un calorímetro hadrónico (HCAL) y el sistema de muones [13].

### 4.2.1. Imán superconductor

Un alto campo magnético hace posible medir precisamente el momento de partículas cargadas, particularmente, el momento de muones con un momento transversal alto. El imán superconductor de CMS, alrededor del cual se construye todo el experimento, es un solenoide y está hecho de bobinas de alambre creado para generar un campo magnético de 4 Teslas en una cavidad de 6 m de diámetro y 12.5 m de longitud, con el fin de trazar las trayectorias de las partículas emergentes de colisiones de alta energía en el LHC. Cuanto más impulso tiene una partícula, menor es su trayectoria perturbada (curvada) por el campo magnético, es por

eso que el trazado de su trayectoria proporciona una medida del impulso de las partículas, y en conjunto con las mediciones de posición proporcionadas por los rastreadores y detectores de muones, otorga una medición más precisa del impulso de estas partículas.

El sistema de rastreo y los calorímetros ECAL y HCAL se ubican dentro de la bobina magnética, mientras que los detectores de muones están intercalados con una estructura de hierro que rodea las bobinas magnéticas, las contiene y guía el campo.

### 4.2.2. Sistema de rastreo interno

El sistema de rastreo interno de CMS es el subdetector con la ubicación más cercana al punto de interacción en el centro del CMS y está diseñado para proporcionar una medición precisa y eficiente de las trayectorias de partículas cargadas que emergen de las colisiones del LHC [13].

El sistema de rastreo funciona al rodear el punto de interacción. Tiene una longitud de 5.8 m y un diámetro de 2.5 m. Debido al gran campo magnético y luminosidad generados por el solenoide de CMS, se tienen, en promedio alrededor de 1000 partículas resultantes de más de 20 interacciones protón-protón simultáneas que interactúan con el tracker cada 25 ns.

El *inner tracker* del CMS está compuesto por un detector de pixeles con tres capas de barril con radios entre 4.4 cm y 10.2 cm y un *Silicon strip tracker* con capas de detección de 10 barriles que se extienden hacia afuera hasta un radio de 1.1 m [13].

### 4.2.3. Calorímetro electromagnético (ECAL)

Con la finalidad de obtener una mejor imagen de los eventos que ocurren en el LHC, CMS tiene la tarea de medir las energías de las partículas emergentes, especialmente los muones y fotones, debido a su importante papel en el descubrimiento del bosón de Higgs y nueva física. Para esto, se emplea un calorímetro electromagnético capaz de trabajar en condiciones hostiles como son un gran campo magnético y muy alta radiación, además de un tiempo de aproximadamente 25 ns entre colisiones.

El ECAL es un calorímetro homogéneo hermético hecho de 61200 cristales de tungstato de plomo ( $\text{PbWO}_4$ ) montados en la parte central del cañón cerrado por 7324 cristales en cada uno de los dos extremos (figura 4.3). El medio homogéneo garantiza una mejor resolución energética al minimizar las fluctuaciones de muestreo [14].

El cristal de tungstato de plomo está hecho principalmente de metal con un toque de oxígeno, su forma cristalina es tan transparente que emite pulsos de luz proporcionales a la energía de la partícula cada que es atravesado por electrones y fotones. Los centelleos rápidos, cortos y bien definidos que producen estos cristales permiten un detector de alta precisión y bastante compacto.

Los fotodiodos de avalancha (APD) se utilizan como fotodetectores en el barril (Barrel) y los fototriodos de vacío (VPT) en las tapas terminales (Endcaps). Estos fotodetectores detectan los pulsos emitidos y los convierten en una señal eléctrica que posteriormente se amplifica para su análisis.

El ECAL, compuesto por una sección de barril y dos “tapas finales”, forma una capa entre el rastreador y el HCAL. Adicionalmente, el ECAL contiene detectores Preshower ubicados frente a las tapas finales que permiten distinguir entre fotones individuales de alta energía (a menudo indicadores de algún descubrimiento interesante) y fotones de baja energía [14].

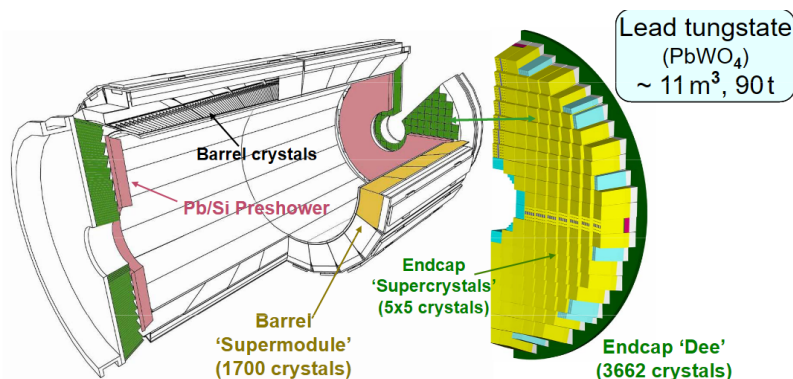


Figura 4.3: Vista esquemática del calorímetro electromagnético de CMS [14].

#### 4.2.4. Calorímetro Hadrónico (HCAL)

Los calorímetros hadrónicos son necesarios para la medición de la energía de haces de hadrones como protones, neutrones, piones, kaones y neutrinos cuya energía transversal es casi nula. La medición de estas partículas tiene un papel importante, ya que proveen información sobre la existencia de partículas nuevas, por ejemplo, el bosón de Higgs.

A medida que estas partículas se descomponen, pueden dar lugar a otras partículas indistinguibles para el detector CMS. Para detectarlos, el HCAL debe ser “hermético”, es decir, aprehender la mayor cantidad de partículas resultantes de las colisiones, así, si se detectan partículas solamente en un lado del detector, con un desequilibrio en el momento y la energía transversal, se puede decir que se producen partículas imperceptibles.

Con el fin de garantizar la existencia de una nueva partícula, las capas del HCAL están distribuidas de manera escalonada para así evitar el escape de partículas. El HCAL encuentra la posición, energía y tiempo de llegada de una partícula empleando capas alternas de materiales absorbentes y centelleadores fluorescentes que producen un pulso rápido de luz cuando la partícula es detectada, posteriormente, las redes de fibras ópticas capturan la información arrojada por los destellos de luz y la dirigen a cajas de lectura donde los fotodetectores se encargan de amplificar la señal. Cuando la cantidad de luz en una región dada se visualiza como muchas capas de azulejos en profundidad, llamada “torre”, esta cantidad total de luz es una medida de la energía de una partícula [15].

Debido a lo robusto del calorímetro, el HCAL está formado por capas de placas de latón y centellador, se encuentran entre el rastreador y el solenoide. El HCAL consta de 4 secciones importantes: HCAL Barrel (HB), HCAL Endcap (HE), HCAL Outer (HO) y HCAL Forward (HF). La ubicación de estas secciones pueden observarse en la figura 4.4.

#### 4.2.5. El sistema de Muones

El sistema de muones de CMS está diseñado para tener la capacidad de reconstruir el momento y la carga de los muones en todo el rango cinemático del LHC [13]. Debido a la simetría cilíndrica del detector y su estructura en capas, el sistema de muones fue naturalmente diseñado para tener una sección cilíndrica, de barril (Barrel) y 2 regiones planas en los extremos (Endcaps).

En CMS se utilizan tres tipos de detectores gaseosos de partículas en distintas “capas”

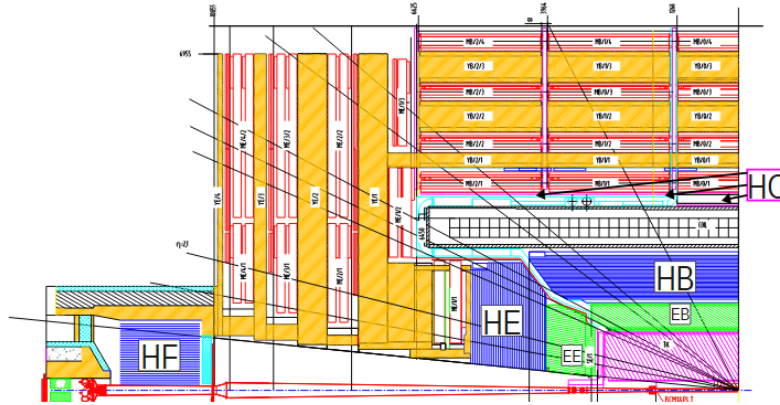


Figura 4.4: La cobertura de ECAL y HCAL se extiende hasta  $|\eta| = 3$ , y se complementa en la región  $3 < |\eta| < 5$  por un calorímetro delantero (HF), hecho de cuarzo y fibras centelleantes. En esta figura se muestra un cuadrante de CMS mostrando las ubicaciones de las secciones más importantes del Calorímetro Hadrónico: HB, HE, HO y HF [15].

en función de su pseudorapidez: Drift Tubes (DT), Cathode Strips Chambers (CSC), y Resistive Plate Chambers (RPCs).

Los DT se utilizan para mediciones precisas de la trayectoria en la región del barril central (Barrel), mientras que los CSC se utilizan en las capas de los extremos (Endcaps).

En la región del barril dentro del rango de pseudorapidez  $0 < |\eta| < 1.2$  donde la radiación de fondo y la tasa de muones es baja, se emplean tubos de deriva de aluminio (drift tube chambers) (DTs), que son utilizados para mediciones precisas de la trayectoria. En una de las regiones planas (Endcaps), hasta una pseudorapidez de  $|\eta| < 2.4$  con un alto flujo de neutrones, se emplean las CSC. Finalmente, las RPCs se encuentran tanto en la región del barril (Barrel) como en las regiones planas de los extremos (Endcaps), proporcionando una señal rápida cuando un muón pasa a través del sistema de muones [8, 16].

Las RPCs proveen una buena resolución temporal (aproximadamente 1 ns) además de una respuesta rápida, sin embargo, cuentan con una medición de posición menos precisa que los DT y las CSC, por lo que en conjunto se puede hacer un rastreo de muones más completo. En el sistema de CMS RPC hay 480 RPCs instaladas en el área del barril y 576 en las tapas de los extremos, correspondiente a una superficie de  $3,500 \text{ m}^2$ .

El sistema de muones está organizado en 4 estaciones llamadas RB1 a RB4 en la región del barril y RE1 a RE4 en la región de las tapas. En las estaciones de barril más internas, RB1 y RB2 se encuentran las RPCs en las caras interior y exterior de las correspondientes cámaras DT. Las estaciones restantes de RPCs en el barril y en las tapas de los extremos se muestran en la figura 4.5.

Debido a que los muones pueden penetrar varios metros de hierro sin interactuar, a diferencia de la mayoría de las partículas ninguno de los calorímetros de CMS los detiene. Por lo tanto, las cámaras para detectar muones se colocan en el mismo borde del experimento, donde son las únicas partículas candidatas a generar una señal (figura 4.6.)

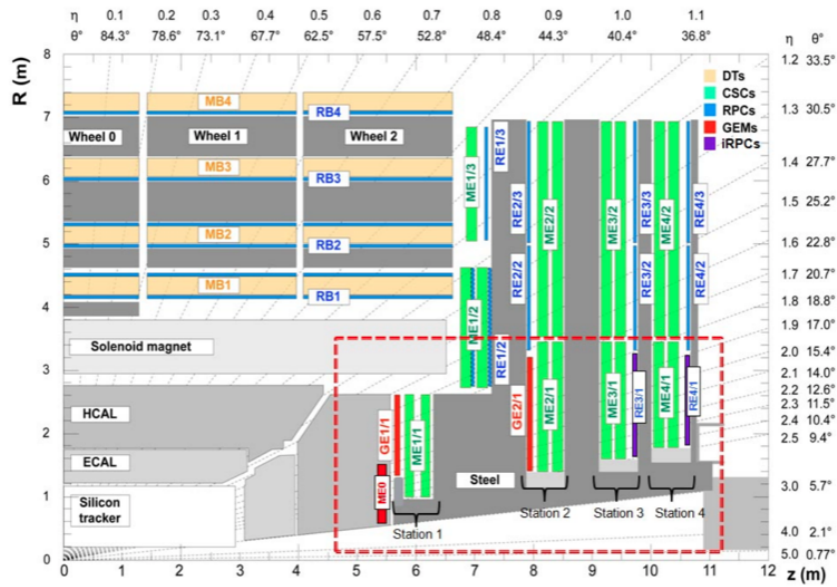


Figura 4.5: Esquema de un cuadrante del sistema de muones, donde se visualizan los detectores: DTs, CSCs, RPCs, iRPCs y GEMs. [16].

### 4.3. RPCs de CMS

Las RPCs de CMS consisten de un ánodo y un cátodo hechos de baquelita, ambos separados por un volumen de aproximadamente 2 milímetros de gas hecho de una mezcla de tres componentes no inflamables : 96.2% de  $C_2 H_2 F_4$  (Freon R-134a, tetrafluoretano), 3.5% de  $C_4 H_{10}$  (isobutano) y 0.3% de  $CF_6$  (hexafluoruro de azufre), se agrega vapor de agua a la mezcla de gases para mantener una humedad relativa de aproximadamente 45% y evitar cambios en la resistencia de la baquelita [16].

Las superficies exteriores del material resistivo están recubiertas con pintura conductora de grafito para formar los electrodos de alta tensión y tierra que permiten la distribución uniforme del voltaje. La lectura se realiza mediante tiras de aluminio separadas del recubrimiento de grafito por una película de PET aislante [18].

Los electrodos de baquelita tienen una resistividad de entre  $10^{10} - 10^{11} \Omega\text{cm}$ . Cuentan con dos planos de líneas conductoras perpendiculares cuya función es recolectar las señales generadas por las partículas cargadas cruzando el detector (readout strips). El ancho de estas líneas determina la resolución espacial.

#### 4.3.1. Readout Strips

La geometría de las RPC strips está diseñada de la necesidad de “activarse” al momento en que los muones pasan, por esto, cada una de las RPCs posee un readout strip. En la dirección de  $\eta$ , cada una de las cámaras se divide en particiones, lo que resulta en tiras de longitudes de 57 a 125 cm en el barril y de 47 a 79 cm en la región de los extremos o Endcaps (figura 4.7).

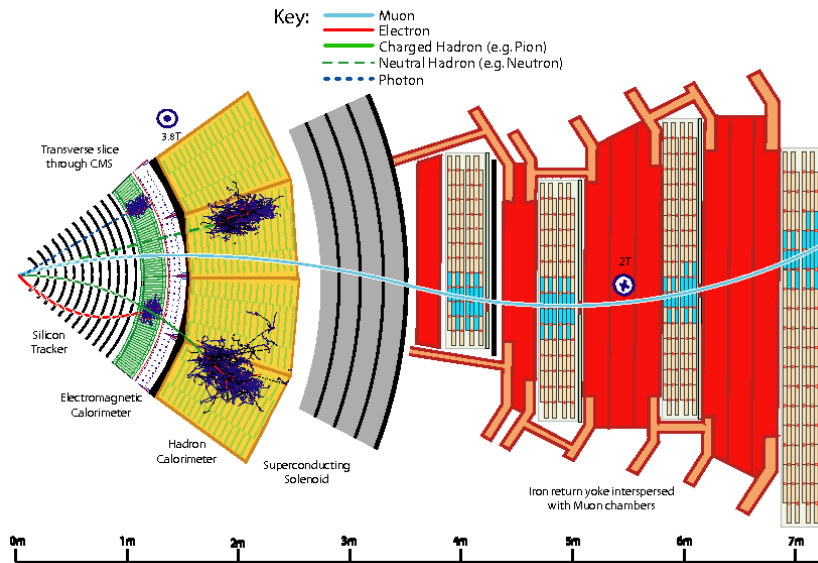


Figura 4.6: Esquema de las interacciones de partículas específicas en un corte transversal del detector CMS, desde la región de interacción del haz hasta el detector de muones. Los muones son partículas cargadas con mayor energía tal que son capaces de llegar a los detectores externos [17].

Posteriormente, en los tableros frontales del detector, con discriminadores programables y modeladores de impulsos, se llevan a cabo las conversiones de las señales producidas en las tiras a pulsos de señalización de bajo voltaje (LVDS) de 100 ns [16].

### 4.3.2. Algoritmo de disparo

Una RPC es capaz de etiquetar el tiempo de un evento ionizante en un tiempo mucho más corto que los 25 ns entre 2 bunch crossing (BX) consecutivos. Por lo tanto, un dispositivo rápido de disparo de muones puede identificar inequívocamente el BX relevante al que se asocia una pista de un muón incluso en presencia de una velocidad alta y del background esperado en el LHC.

Las señales de dichos dispositivos de disparo proporcionan directamente el tiempo y la posición de un hit de muón con la precisión requerida, además de proporcionar la asignación BX a las pistas de candidatos de eventos y estimar los momentos transversales con alta eficiencia. Con el fin de determinar los posibles candidatos a muones para cada haz de partículas del LHC (BX, 25 ns), el trigger de CMS utiliza un algoritmo de comparación de patrones (PAC) implementado en una matriz de puertas programables (FPGAs). Las tiras de RPC disparadas en capas subsiguientes se comparan con los patrones generados utilizando simulaciones de muones de Monte Carlo que pasan a través del detector CMS [8]. Asimismo, las RPC strips están conectadas a un Pattern Comparator Trigger (PACT), que es una proyección en  $\eta$  y  $\phi$ . Las formas PACT activan segmentos que están conectados a procesadores de segmentos que siguen la trayectoria del muón y calculan su  $p_T$ .

**CAPÍTULO 4. COMPACT MUON SOLENOID CMS**  
4.4. MEJORAS EN CMS Y LOS NUEVOS IRPC

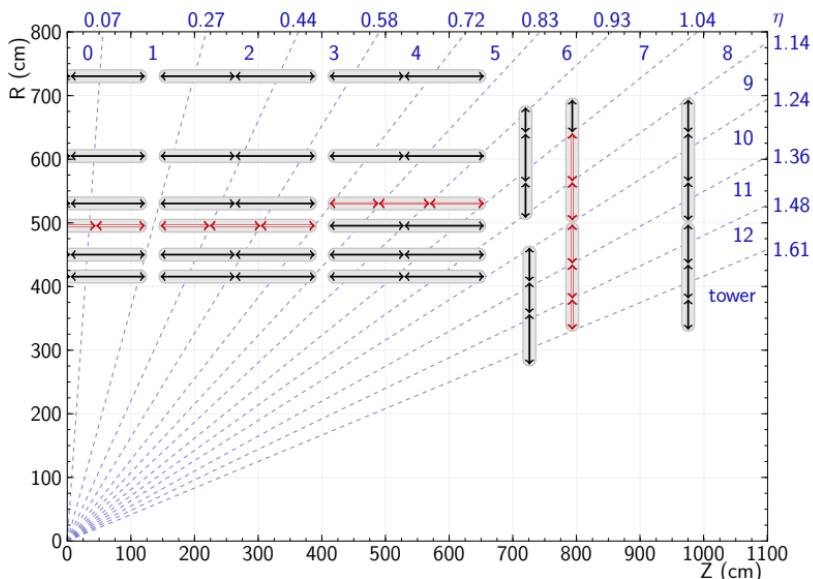


Figura 4.7: Sección transversal de un cuadrante del subdetector RPC de CMS, que muestra las RPC readout strips. [8].

Finalmente, el Global Muon Trigger clasifica las trayectorias de muones medidas en cada detector : RPC, DT y CSC, y convierte estas trayectorias en la misma escala que  $\Phi$ ,  $\phi$  y  $p_T$ , y valida el signo de muón. A continuación, intenta correlacionar las trayectorias CSC y DT con las trayectorias RPC. El conjunto final de muones se clasifica según su calidad inicial, correlación y  $p_T$ , y luego los 4 mejores muones se envían al Global Trigger [19].

#### 4.4. Mejoras en CMS y los nuevos iRPC

Si bien, durante Run-1, el sistema de muones de CMS tuvo un rendimiento bastante tolerante respecto a la radiación y a los efectos de envejecimiento, el LHC se prepara para una importante actualización, el LHC de alta luminosidad (HL-LHC). Con el objetivo de ampliar la sensibilidad para nuevas búsquedas físicas, la luminosidad integrada se multiplicará por diez con respecto a los valores originales del diseño. Se espera que la energía del centro de masa para las colisiones protón-protón aumente de los 13 TeV actuales hasta los 14 TeV. El periodo actual de toma de datos de la fase-1 finalizará en el año 2023, seguido de un cierre para la actualización del HL-LHC que finalizará en 2026. El periodo de alta luminosidad lleva como nombre fase-2 y se espera que dure desde 2026 hasta 2038. El HL-LHC aumentará la luminosidad integrada proyectada de  $300 \text{ fb}^{-1}$  para la fase-1, el periodo actual del LHC, por un orden de magnitud de  $300 \text{ fb}^{-1}$  en las próximas dos décadas, tanto para los detectores CMS como para ATLAS. Durante la operación de alta luminosidad, las condiciones esperadas en términos del background, acumulación y el probable envejecimiento de los detectores actuales harán que la identificación de muones y la asignación correcta del  $p_T$  sean un desafío para el sistema de muones, por lo que, para garantizar la redundancia del sistema de muones en las condiciones HL-LHC, el actual sistema RPC debe mejorarse,

para lo cual, se proyectan dos actualizaciones importantes: se reemplazará la electrónica de apagado del detector RPC (llamado sistema de enlace) y se extenderá la cobertura de RPC de  $\eta = 1.9$  hasta  $\eta = 2.4$ .

En la figura 4.5 se puede ver la región donde serán ubicadas las nuevas RPC (improved RPC o iRPC) para extender la cobertura (dentro del cuadro rojo) y la región afectada por la actualización del sistema de enlace (cuadro violeta).

Con la finalidad de cumplir con los requisitos que CMS requiere para la fase de alta luminosidad, se agregarán dos nuevas capas de RPCs en los anillos más internos de las estaciones 3 y 4, ver figura 4.5. La inclusión de las nuevas iRPCs permitirá un aumento en la eficiencia tanto para el trigger de disparo así como en la reconstrucción en un área cercana a la región de colisión, donde el background es el más alto y el campo magnético es el más bajo dentro del sistema de muones.

La capacidad de velocidad más alta con respecto a los detectores RPC actuales se logrará acortando el tiempo de recuperación de los electrodos y reduciendo la carga total producida en una descarga. Para ello, las iRPC utilizan electrodos más delgados y un espacio de gas más estrecho, ambos reducidos de un grosor de 2 mm en el diseño actual a 1.4 mm. Además, se reduce el alto voltaje operativo [16].

Dado que el diseño de doble gap demostró ser de alto rendimiento, se mantendrá para las iRPC. Las nuevas estaciones terminales identificadas como RE3/1 y RE4/1 tendrán una capa compuesta por iRPCs. La resistividad del electrodo se mantendrá en el rango de 0.9 a  $3.0 \cdot 10^{10} \Omega cm^2$ . La elección de referencia del material es HPL (baquelita), como es el caso actualmente de las RPC.

La carga integrada máxima esperada en las RPC se puede evaluar sobre la base de la luminosidad integrada esperada en el HL-LHC, definiendo un límite superior hasta el cual el sistema de RPC necesita ser probado para el envejecimiento y el efecto de radiación. La carga total integrada, al final de HL-LHC, será de  $280 mC/cm^2$  en el punto más caliente del sistema RPC actual.

En el pasado, se llevaron a cabo extensas pruebas de irradiación a largo plazo en varias instalaciones de rayos gammas y neutrones que certificaban el rendimiento del detector durante diez años del LHC: RPCs de tamaños completos así como prototipos pequeños se irradiaron con fotones hasta una carga integrada de 50 y de  $400 mC/cm^2$ , respectivamente [20].

Recientemente, se han realizado, o están en curso, nuevas pruebas para certificar el actual sistema RPC para las condiciones HL-LHC esperadas: una carga integrada de  $840 mC/cm^2$  y hit rates de background de  $600 Hz/cm^2$ . Como referencia, durante Run-1, el sistema RPC proporcionó un funcionamiento estable y un rendimiento excelente y no mostró ningún efecto de envejecimiento para una carga integrada del orden de  $10 mC/cm^2$  [20].

Como se ha mencionado, el envejecimiento de las RPCs en gran parte depende de los materiales con los que están construidas. En general, se cree que la carga de avalancha depositada sobre las superficies de los electrodos RPC se disipa tanto a través del volumen de los electrodos como a lo largo de sus superficies, y en menor cantidad a través de espaciadores y bordes [21].



## Capítulo 5

# Simulaciones

El método de Monte Carlo (MC) es un método numérico que permite obtener soluciones aproximadas de problemas físicos y matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias.

La simulación de MC es una componente esencial de la física experimental de partículas en todas las fases de su ciclo de vida: la investigación del alcance físico de los conceptos de detectores, el diseño de instalaciones y detectores, el desarrollo y la optimización del software de reconstrucción de datos, así como el análisis de datos para la producción de resultados físicos [22].

La simulación de dichos procesos físicos en detectores de partículas es una herramienta importante para comprender el comportamiento de los detectores en los experimentos de física de partículas en los que están o serán implementados. Para optimizar los parámetros físicos del detector como mezcla de gas, presión de gas, ganancia de gas, ruido, ajustes de umbral, entre otros, generalmente se lleva a cabo una simulación detallada de la respuesta del detector [23].

Geant4 es un software basado en la simulación mediante MC y compuesto de herramientas que se usan para simular de manera precisa el paso de partículas a través de materia.

Geant4 trata las partículas individuales simuladas una a la vez en lugar de las distribuciones de partículas, y las transporta a través de un modelo de masa del universo definido por límites geométricos entre materiales en lugar de una cuadrícula. Cuando una partícula es “inyectada”, Geant4 calcula la trayectoria libre media de todos los procesos físicos discretos implementados, calcula una distancia aleatoria asociada con cada proceso y elige la distancia más corta a ser implementada. Posteriormente determina todas las propiedades físicas de la partícula después del proceso escogido, incluyendo su nueva posición tomando en cuenta los procesos físicos continuos, por ejemplo, la pérdida de energía por electrones que ocurren constantemente [24].

En esta tesis, se usa Geant4 para simular el paso de neutrones, electrones, positrones y gammas a través de los detectores RPCs con el fin de medir su sensibilidad ante estas partículas de background (radiación de fondo fijo). Estos estudios sirven para el diseño y construcción de detectores más robustos que puedan trabajar con altas eficiencias en ambientes de radiación hostiles, además de dar un mejor entendimiento del background para poder abstraerlo de las señales de interés.

Las simulaciones son elaboradas con Geant 4.9.6 utilizando la lista física FTTFP\_BERT\_HP recomendada por el grupo hadrónico Geant4 para simular interacciones de neutrones hasta energías térmicas. El umbral de energía en Geant4 se expresa en términos del rango. Se han utilizado cortes estándar en Geant4: Gammas  $1 \mu\text{m}$ , Electrones  $1 \text{ nm}$ , Positrones  $1 \mu\text{m}$ . Estos cortes se realizan por debajo de los umbrales establecidos en FLUKA en cada tipo de material. FLUKA es un paquete de simulación de Monte Carlo de física de partículas completamente integrado. Tiene muchas aplicaciones en física experimental y otras áreas. Una de sus aplicaciones es facilitar los cálculos de transporte de partículas e interacciones con la materia [25].

## 5.1. Simulaciones de RPCs en Geant4

Para los trabajos de simulación en esta tesis, se considera la geometría de un RPC denominada RE1/1 (por su ubicación -en la región 1 del Endcap- que ocupaba dentro del detector de muones). Durante el LS1 -Long Shutdown 1- (o parada técnica que se usa para hacer mejoras en los detectores y en el LHC), se instalaron cuatro RPCs (RE1/1) en el espectrómetro de CMS; en una de las regiones de mayor radiación dentro del espectrómetro por encontrarse cerca del punto de colisión. Los estudios realizados con el RE1/1 ayudan en el entendimiento del rendimiento y los efectos de la radiación sobre los detectores. Durante el LS2, los detectores se removieron para dar lugar a otros detectores gaseosos GEM (Gas Electron Multiplier), identificados como GE1/1 en la región 1 en la figura 4.5.

Aunque en la sección 4.3 se mencionó de manera general la composición de las RPCs, las simulaciones que se implementan en Geant4 utilizan una descripción detallada de la geometría de las RPCs. En la figura 5.1 se muestran las dimensiones y forma trapezoidal de RE1/1 así como la composición de la baquelita (HPL-High Pressure Laminate) y la mezcla de gases que se utilizan en el detector. Además en la tabla se ordenan los materiales con respecto al ensamblaje de las diferentes “capas” de RE1/1 mostrando las densidades y espesores de los mismos. Como se mencionó anteriormente las RPCs de CMS son detectores de doble espaciamiento o “gap” (donde se simula la mezcla de gases), como se puede apreciar en la tabla.

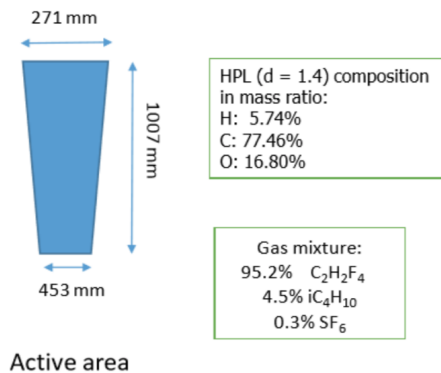


Figura 5.1: Geometría y dimensiones de RE1/1, mostrando la composición de la baquelita, además de la mezcla de gases utilizada en el detector.

**CAPÍTULO 5. SIMULACIONES**  
**5.2. VISUALIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN**

---

Layer n	Material	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	Thickness [mm]
1	Mylar Electrical insulation	1.39	0.2
2	Total mylar on HV side	1.39	0.4
3	Copper GND	8.96	0.038
4	Top hpl out	1.4	2
5	Gas gap	0.003569	2
6	Top hpl in	1.4	2
7	Total mylar on GND side	1.39	0.2
8	CU strips	8.96	0.017
9	FR4	1.86	0.400
10	Total mylar on GND side	1.39	0.2
11	Bottom hpl in	1.4	2
12	Gas gap	0.003569	2
13	Bottom hpl out	1.4	2
14	Copper GND	8.96	0.038
15	Total mylar on HV side	1.39	0.4
16	Mylar Electrical insulation	1.39	0.2
17	Aluminium bottom panel	0.003569	5

## 5.2. Visualización de la simulación

Geant4 permite visualizar la simulación del detector capa por capa. Además de las capas de la tabla anterior, se han simulado otras capas (sobre las mencionadas en la tabla) para hacer la simulación más fiel al detector real. A continuación se muestran las capas superiores con las especificaciones más relevantes. Es importante enfatizar que además de los materiales se está simulando el agua que pasa por los tubos de cobre y que forma parte del sistema de enfriamiento. Así como el gas que se encuentra dentro del detector y que permite que se lleven a cabo los procesos de ionización para poder registrar las señales en el detector.

En la figura 5.2 se muestra la visualización de las capas superiores de RE1/1 en Geant4. (a) Simulación de las barras de aluminio dentro del honeycomb con espesor de 5 mm. (b) Tubo de enfriamiento de cobre de 5 mm de espesor y 6 mm de diámetro con la simulación del agua dentro del tubo, (c) Caja de Faraday de aluminio para los FEBs (Front End Boards) de 1 mm de espesor, (d) Paneles de enfriamiento de cobre con espesor de 2 mm, (e) FEBs FR4 (Flamant Resistant 4) con espesor 1.6 mm, (f) Cubierta de aluminio para los FEBs y los cables para las señales con 0.5 mm de espesor.

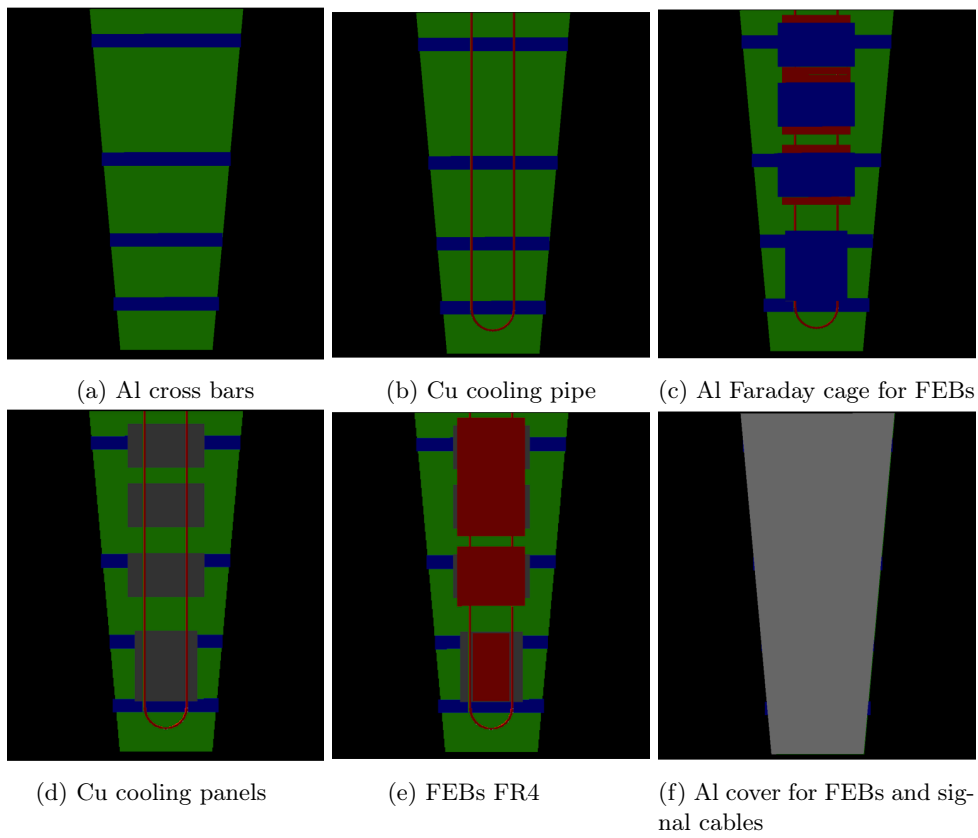


Figura 5.2: Visualización de las capas superiores de RE1/1 en Geant4, donde se aprecian los detalles de la geometría del detector en la simulación.

# Capítulo 6

## Resultados

Los muones han jugado un papel importante en la búsqueda de nueva física como se mostró con el descubrimiento del Higgs. Por ser partículas altamente energéticas y cargadas, capaces de atravesar el espectrómetro de CMS, es probable que los muones proporcionen las únicas señales “limpias” de la nueva física en el LHC. Por ello la eficiencia y desempeño del sistema de muones es de gran importancia para CMS.

Las RPCs, así como otros detectores en el LHC, trabajan en ambientes hostiles de radiación constituidos principalmente por rayos gamma y neutrones. Esta radiación se incrementará aún más en la fase-2 de alta luminosidad (LH-LHC). Esta tesis se centra en los estudios de simulación detallados de las RPCs para entender cómo esta radiación puede afectar la funcionalidad de los detectores. Estos estudios son cruciales en el diseño y construcción de nuevos detectores capaces de funcionar óptimamente en ambientes de radiación extrema, por lo que son una guía en las modificaciones que se deberán realizar para la fase de alta luminosidad en el CERN. Además pueden mejorar los estudios de análisis de datos a través de un mejor entendimiento del background.

Como se mencionó en el capítulo anterior, usando Geant4 se ha hecho una simulación detallada de la geometría del detector RPC, identificado como RE1/1. La simulación nos permite calcular parámetros que son de utilidad para entender la respuesta del detector a la radiación. En Geant4 se han utilizado cuatro tipos de flujos de partículas o radiación: neutrones, gammas, electrones y positrones que impactan de manera uniforme al detector. Calculando la razón de los eventos detectados a los generados en la simulación, podemos estimar la “sensibilidad” que el detector presenta a los diferentes tipos de radiación.

### 6.1. Sensitivity

La respuesta del detector a las partículas se conoce como sensibilidad ( $S$ ), esto es la probabilidad de que una partícula cargada a una energía determinada produzca una señal en el detector. Para ello se considera que al menos una partícula cargada entra en al menos uno de las gaps para producir la señal [26] y se define como:

$$S = \frac{N_{\text{eventos-Detectados}}}{N_{\text{eventos-Generados}}} \quad (6.1)$$

## CAPÍTULO 6. RESULTADOS

### 6.1. SENSITIVITY

Como se ha mencionado, ningún detector es sensible a todos los tipos de radiación a cualquier rango de energía, esto se debe a que la sensibilidad es función de la energía de las partículas incidentes y por lo tanto existen diferentes procesos que pueden ser responsables de la producción de partículas secundarias. Cada detector está diseñado con una sensibilidad a cierta radiación a distintos valores de energía, fuera de estas especificaciones, las señales obtenidas resultan ineficientes. La sensibilidad de un detector a un tipo específico de radiación y energía, depende de distintos factores como son: la sección transversal para reacciones ionizantes dentro del detector, la masa, el ruido del detector y el material de protección que rodea el volumen sensible del detector [19].

En las siguientes figuras se muestran los resultados, de la sensibilidad de RE1/1 en función de la energía, para diferentes partículas provenientes de las simulaciones de Monte Carlo en Geant4. Como se ha mencionado la sensibilidad se calcula de la relación entre el número de partículas incidentes que producen una señal y el número de señales generadas con el MC. Los valores de sensibilidad se expresan en porcentajes y los valores de energía se expresan en MeV. Para la simulación se generaron  $10^5$  eventos de Monte Carlo para cada partícula (electrones, positrones, neutrones y gammas) en el rango de energías mostrado en la figura 6.1. De acuerdo a la definición de sensibilidad y al número de eventos generados, se puede ver que el valor mínimo de la sensibilidad sería de 0 (cuando ninguna partícula registra una señal en el detector) y el máximo sería de 1 (cuando todas las partículas que se generaron producen una señal); el valor de  $1/10^5$  representaría el caso cuando de todas las partículas generadas, sola una ha registrado una señal en el detector a una energía específica.

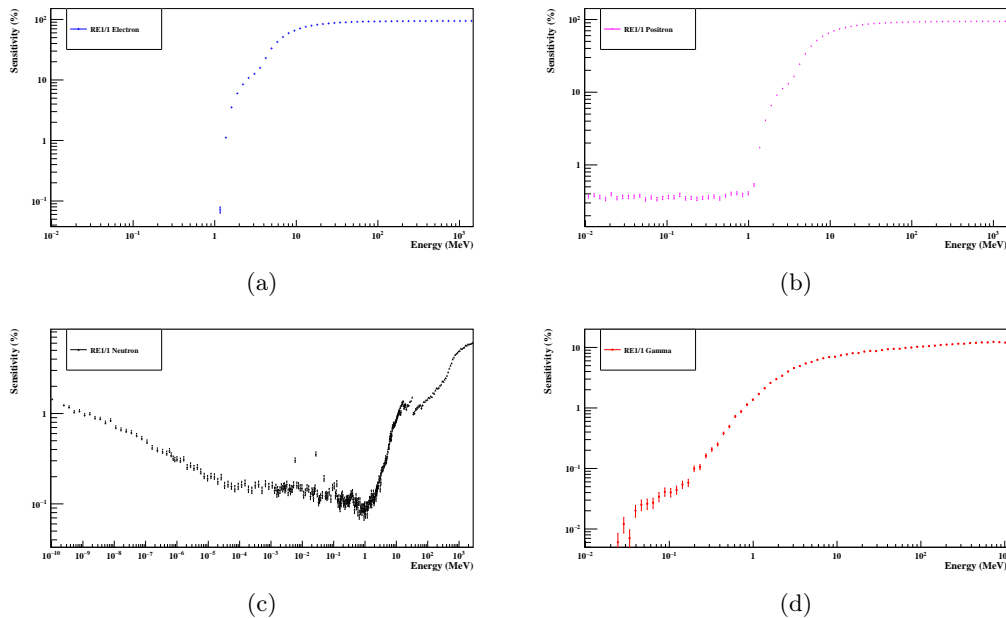


Figura 6.1: Curvas de sensibilidad vs energía de (a) electrones, (b) positrones, (c) neutrones y (d) gammas.

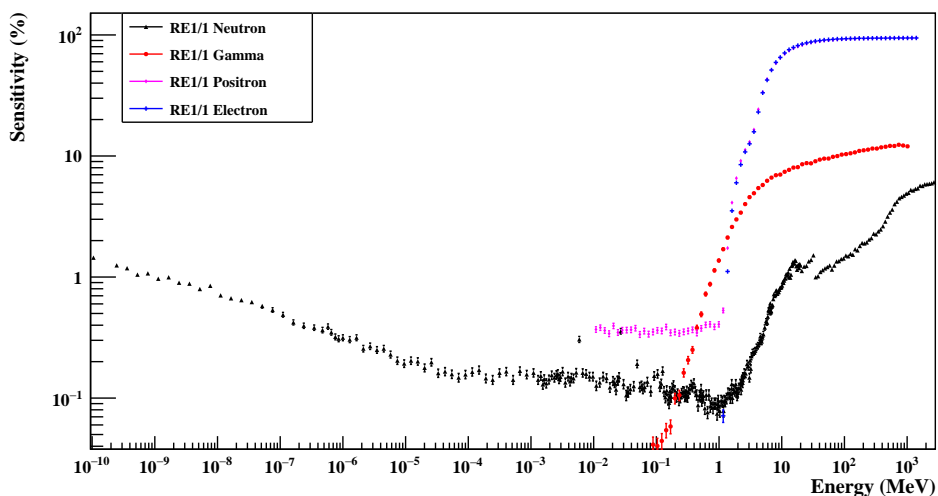


Figura 6.2: Superposición de las curvas de Sensibilidad vs Energía para gammas, neutrones, positrones y electrones para RE1/1.

La figura 6.2 muestra los resultados de sensibilidad en función de la energía para las diferentes partículas estudiadas. De acuerdo al tipo de partícula, sus propiedades cinemáticas y la composición del material con el que interactúan, los siguientes procesos son los dominantes: Para neutrones de alta energía ( $> 10$  MeV) el proceso dominante es la dispersión inelástica, mientras que para neutrones intermedios ( $10^{-5}$  a  $10$  MeV) y de baja energía ( $< 10^{-5}$  MeV) son la dispersión elástica y la captura de neutrones respectivamente. Para  $\gamma$ 's de alta energía ( $> 10$  MeV) la producción de pares es dominante, mientras que para intermedios ( $10^{-1}$  a  $10$  MeV) y bajos valores ( $10^{-1}$  MeV) son la dispersión Compton y el efecto fotoeléctrico respectivamente. En el caso de  $e^{\pm}$  de alta energía ( $> 1$  MeV) la radiación Bremsstrahlung tiene una contribución grande mientras que para baja energía ( $< 1$  MeV) el proceso de ionización es dominante. Las partículas neutras (neutrones y  $\gamma$ 's) necesitan pasar por una reacción de conversión antes de producir una partícula cargada. Los neutrones interactúan a través de la fuerza nuclear, lo que significa que la interacción es de corto alcance [27].

En la figura 6.2 se observa además que independientemente de las partículas analizadas, a mayores energías se puede apreciar un incremento en la sensibilidad del detector. Esto resulta natural cuando se piensa que una partícula más energética tendrá mayor probabilidad de causar ionización en el gas del detector y por tanto producir una señal en el mismo.

## 6.2. Particle flux

Para recrear las condiciones experimentales y simular la radiación del ambiente dentro del detector de CMS y en la caverna del mismo se utiliza FLUKA, ya que puede simular con alta precisión la interacción y propagación de aproximadamente 60 partículas diferentes, incluidos fotones y electrones de 1 keV a miles de TeV, neutrinos, muones de cualquier energía, hadrones de energías de hasta 20 TeV y todas las antipartículas correspondientes,

neutrones hasta energías térmicas e iones pesados.

El flujo de partículas incidentes esperado se ha estimado con FLUKA, tomando en cuenta la geometría de CMS para Run-2, considerando colisiones protón-protón a 13 TeV, con la luminosidad instantánea nominal de  $1.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

Utilizando los espectros de flujos de background provenientes de FLUKA podemos hacer una convolución con los valores de sensibilidad a diferentes energías para obtener el Hit Rate (razón de choque) del detector. El Hit Rate es importante ya que puede compararse con los datos experimentales provenientes del detector.

En las siguientes figuras se muestran los espectros de flujos de energía (expresados en  $\text{Hz/cm}^2$ ) para las diferentes partículas de interés, para la región donde se encuentra RE1/1. Las diferencias en las curvas están asociadas a los diferentes tipos de interacción de acuerdo a las características de las partículas y con la geometría del espectrómetro de CMS en esa región 1/1. En esta tesis no se han simulado estos flujos y se han obtenido directamente de uno de los colaboradores de CMS.

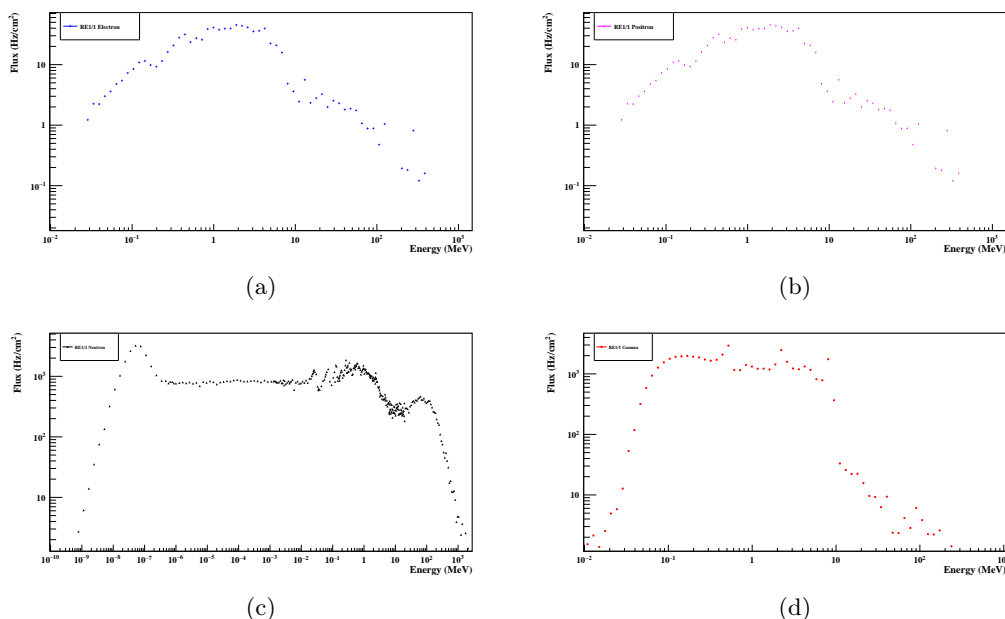


Figura 6.3: Estimación de los flujos de energía usando FLUKA para (a) electrones, (b) positrones, (c) neutrones y (d) gammas para la región de interés donde se encuentra RE1/1.

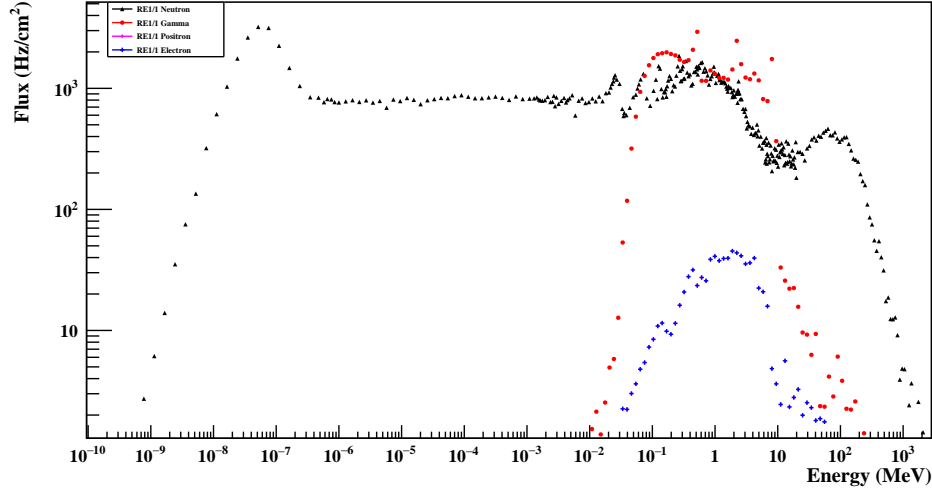


Figura 6.4: Superposición de las curvas de los flujos de energía estimados para diferentes backgrounds, usando FLUKA, en la región donde se encontraba RE1/1. Esta región es de gran interés ya que es una de las regiones con mayor radiación debido a que se encuentra cerca del punto de colisión. Las curvas se expresan en función de la energía de las partículas incidentes.

De acuerdo a la simulación de FLUKA [28], la mayor contribución en la región en donde se encontraba RE1/1 proviene de neutrones de baja energía ( $10^{-11}$  a  $10^4$  MeV),  $\gamma$ 's ( $10^{-3}$  a  $10^4$  MeV),  $e^\pm$  ( $10^{-2}$  a  $10^4$  MeV) y hadrones cargados ( $10^{-1}$  a  $10^4$  MeV). Esta composición domina el campo mixto de background para los experimentos del LHC, otras contribuciones menores y partículas rápidas son despreciadas, ya que sus secciones transversales de producción son de un orden de magnitud más bajo que aquellas de las partículas de background y por tanto no son relevantes para estos estudios.

### 6.3. Hit Rate

Con el objetivo de comparar los resultados de las simulaciones con los datos reales del experimento, se necesitan convertir los flujos de partículas a Hit Rate. Por tanto se hace una convolución entre el flujo de partículas y la sensibilidad a diferentes valores de energía. El Hit Rate se expresa en términos de  $Hz/cm^2$  y se puede entender como la frecuencia de choques de partículas con el detector en términos de tiempo y área. Para la fase de alta luminosidad del LHC se espera que el Hit Rate aumente considerablemente [29] y debe entenderse cómo este incremento afectará el funcionamiento de los detectores.

El Hit Rate ( $N_{HIT}$ ) para un tipo específico de partícula a una energía dada se estima normalizando el flujo incidente  $Flux$  para la sensibilidad del detector  $S$ .

$$N_{HIT} = Flux \times S \quad (6.2)$$

El Hit Rate total ( $N_{HITTOTp}$ ) para cada tipo de partícula de background, está dado

por la suma de  $N_{HIT}$  para cada valor de la energía.

$$N_{HITTOTp} = \sum Flux \times S \quad (6.3)$$

El Hit Rate total, para todos los tipos de partículas de background, está dado por la suma de las contribuciones de las diferentes partículas que constituyen el background.

$$N_{HITTOT} = \sum N_{HITTOTp} \quad (6.4)$$

Las siguientes gráficas muestran las curvas de Hit Rate como función de la energía para las diferentes partículas de background. Estos resultados son de gran importancia ya que estiman el comportamiento de los diferentes tipos de radiación sobre los detectores y la respuesta de los mismos a esta radiación. Estos resultados pueden compararse con datos reales como se ha hecho en CMS para diferentes regiones del detector [26, 30].

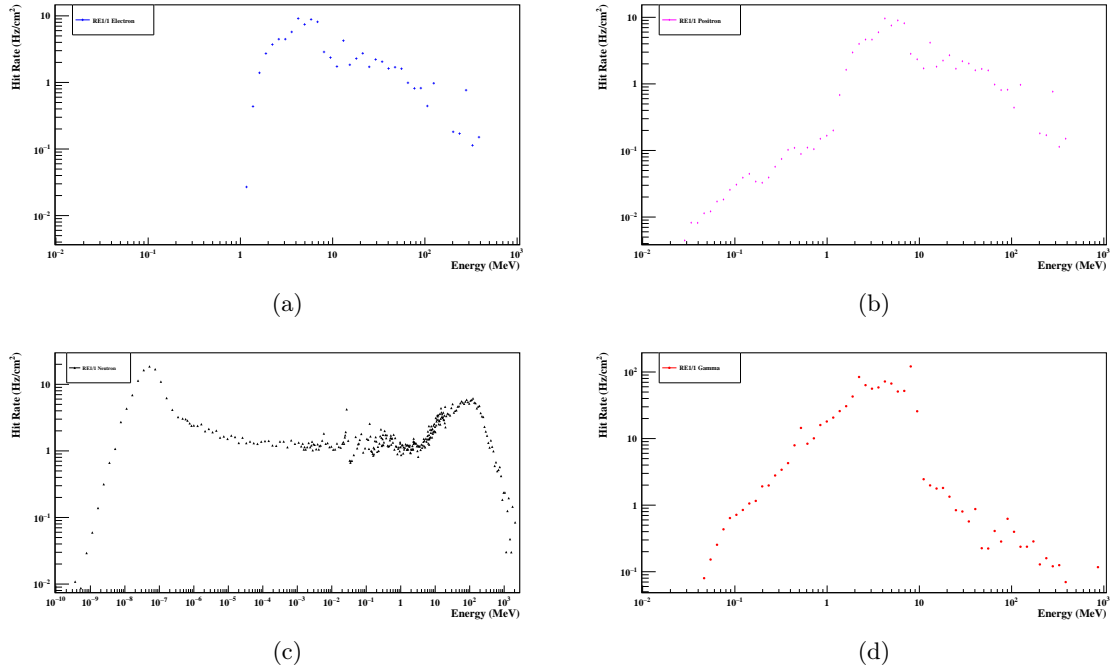


Figura 6.5: Curvas del Hit Rate para RE1/1 obtenidas de la convolución de los flujos de energía y los valores de sensibilidad del detector para (a) electrones, (b) positrones, (c) neutrones y (d) gammas.

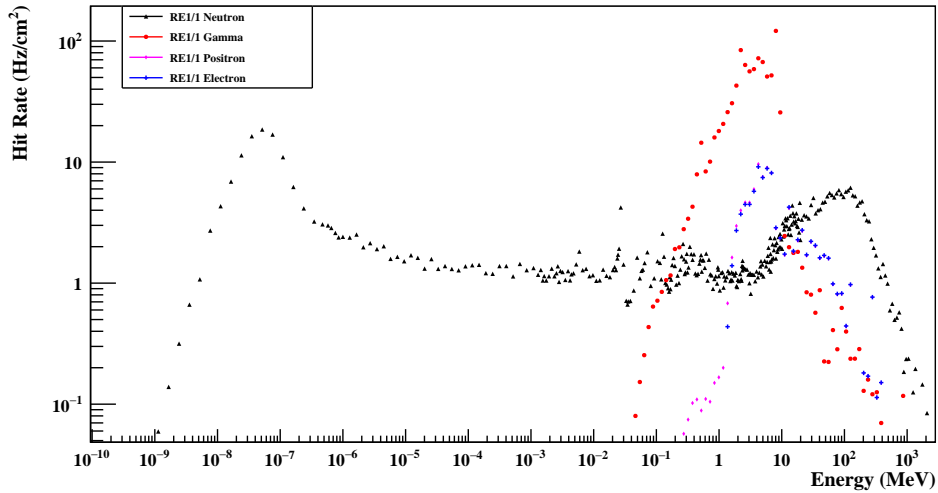


Figura 6.6: Superposición de las curvas del Hit Rate vs Energía para la región de RE1/1.

En la figura 6.6 se observa la comparación de las curvas del Hit Rate en función de la energía, provenientes de la radiación de fondo de neutrones, electrones, positrones y gammas. Debido a que el Hit Rate es la convolución de la sensibilidad con el flujo de energías, las diferencias en las curvas están relacionadas con los diferentes procesos físicos asociados con cada partícula (como se explicó en las curvas de sensibilidad) y con las distribuciones de los flujos de acuerdo a las características de la geometría del espectrómetro de CMS en la región 1/1.

Utilizando los valores del Flujo Total y del Hit Rate para las diferentes partículas, podemos estimar los valores promedio de la sensibilidad de acuerdo a:

$$S_{prom} = \frac{N_{HITTOTp}}{FLUX_{TOT}} \quad (6.5)$$

donde  $N_{HITTOTp}$  corresponde a la suma de todos los puntos del Hit Rate y  $FLUX_{TOT}$  corresponde al flujo total de partículas como se indicó con anterioridad. Los valores obtenidos se presentan en la tabla 6.1.

Partículas	Sensibilidad promedio RE1/1 (%)
Gammas	$1.79 \pm 0.032$
Neutrones	$0.29 \pm 0.015$
Electrones	$11.30 \pm 0.100$
Positrones	$11.71 \pm 0.100$

Tabla 6.1: Valores estimados para la sensibilidad promedio.

La referencia [29] reporta valores promedio de sensibilidad para RE3/1 que concuerdan con nuestros valores promedio de sensibilidad para fotones y neutrones en RE1/1.

Las curvas de Hit Rate estiman la cantidad de partículas para cada valor de energía por  $cm^2$  por segundo, de modo que, si se quiere conocer la cantidad total de partículas de background en todo el espectro de energía, se calcula el Hit Rate total  $N_{HITTOT}$ , esto corresponde a la suma de cada punto del Hit Rate en la gráfica 6.6 para cada partícula respectivamente (neutrones, electrones, positrones y gammas). Los resultados correspondientes se presentan en la tabla 6.2. Se puede apreciar de manera general, que un mayor número de partículas de background correspondientes a los fotones estarían llegando al detector en RE1/1 y los neutrones tendrían una contribución de alrededor de  $650 Hz/cm^2$ .

En la referencia [26] se hace un estudio de simulación equivalente al nuestro para los detectores iRPCs de CMS, que se espera se encuentren operacionales en las regiones RE3/1 y RE4/1 en la fase de alta luminosidad (HL-LHC). Las gráficas correspondientes a la sensibilidad y Hit Rate como función de energía para las iRPCs concuerdan con nuestros resultados. Además se presenta una gráfica del Hit Rate esperado en la estación RE3/1 en función de la distancia del centro de CMS al beam pipe (R en cm). De la misma se estima que la razón promedio de background es cercana a  $600 Hz/cm^2$ , lo que permite calcular que el requerimiento mínimo de la razón de capacidad (rate capability) para los iRPCs debe ser de aproximadamente  $2,000 Hz/cm^2$ , cuando se considera un factor de seguridad de tres.

Partículas	RE1/1 Hit Rate en $Hz/cm^2$
Gammas	$882 \pm 16$
Neutrones	$648 \pm 34$
Electrones	$90 \pm 34$
Positrones	$94 \pm 1$

Tabla 6.2: Valores esperados del Hit Rate total, para las diferentes partículas de radiación de fondo estudiadas.

Un estudio más completo de la presente investigación podría incluir la gráfica del Hit Rate en función de la distancia del centro de CMS al beam pipe (R en cm). De esta gráfica se podría hacer una estimación equivalente a la realizada en [26] para el Hit Rate esperado en la región RE1/1. En la presente tesis consideramos que esto no era necesario ya que CMS decidió incluir los detectores GEMs en la región 1/1 (donde se han reportado estudios de background [27]) y no utilizar RPCs. Es importante mencionar que hubiera sido posible incluir RPCs en esta región, que trabajarían eficientemente en altos flujos de radiación, como se ha mostrado en [31] donde por ejemplo se utilizan cámaras hechas con un vidrio nuevo de baja resistividad.

Debido a que la cámara simulada en la presente tesis, representa una cámara genérica en términos de la composición, es decir contiene los mismos materiales que las otras RPCs en el detector de muones. Esto permite que los resultados de sensibilidad obtenidos en esta tesis se puedan utilizar para hacer estudios de otras cámaras en otras áreas del detector. Bastaría con utilizar los flujos de energía provenientes de FLUKA en el área de estudio dentro del detector para hacer la convolución con la sensibilidad y obtener los hits rates.

Los resultados presentados en esta tesis así como los reportados en [26], [27], [30], [29] son importantes, ya que a través de las simulaciones, se puede calcular la radiación de background a la que se someten los detectores (tanto en las corridas recientes como

en la fase de alta luminosidad). Estos estudios por tanto han ayudado a determinar el tipo de detectores a utilizar en las diferentes zonas de alta radiación y a cambiar las características de los mismos (tamaños de gaps, electrónica, composición, etc.) para garantizar el buen funcionamiento durante las condiciones extremas de radiación. Asimismo la simulación ha permitido identificar las zonas con mayor radiación y por tanto se han podido implementar blindajes dentro del experimento de tal forma que los detectores estén protegidos. Para la fase de alta luminosidad se están llevando a cabo más estudios con simulaciones más precisas tanto a nivel de detectores como de la radiación del ambiente en la caverna, por lo que se espera que se implementen más blindajes en un futuro.



# Capítulo 7

## Conclusiones

El nombre del Experimento CMS (Compact Muon Solenoid) pone de manifiesto la importancia del detector de muones en la búsqueda de nueva física. Este detector se compone de tres sub-detectores incluyendo las RPCs (Resistive Plate Chambers), que son detectores gaseosos que combinan una buena resolución espacial y temporal, idóneos para los sistemas de rastreo (tracking) y disparo (trigger) para la identificación de muones.

Durante la fase de alta luminosidad LH-LHC se espera un incremento en la luminosidad por un factor de 10 ( $10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) comparado con el valor de diseño del LHC ( $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). La luminosidad es proporcional al número de colisiones por unidad de área por unidad de tiempo. Por lo tanto, a mayor luminosidad, mayor número de datos y mayor probabilidad de encontrar procesos de nueva física y de mejorar la estadística de procesos conocidos. Sin embargo con el incremento de la luminosidad también se incrementarán los procesos de background o ruido de fondo. Por tanto para garantizar el buen funcionamiento de los detectores es importante estudiar y entender la radiación de background y su impacto sobre los mismos.

En esta tesis se presenta un estudio de simulación de Monte Carlo de los efectos de radiación sobre los detectores Resistive Plate Chambers (RPCs) en el Experimento CMS. Estos estudios son importantes ya que ayudan al diseño de detectores más robustos que puedan soportar ambientes hostiles de radiación. Así mismo pueden aportar información valiosa para crear un mejor blindaje que proteja los detectores y la electrónica para su mejor funcionamiento.

La simulación se lleva a cabo utilizando la geometría del detector identificado como RE1/1, debido a que se encuentra en la región 1/1 del Endcap de CMS. Esta región es de gran interés ya que recibe una alta radiación al encontrarse cerca del punto de colisión.

El RE1/1 se simula de forma detallada, utilizando el paquete de Monte Carlo conocido como Geant4. Este paquete permite simular las interacciones de las partículas basado en una descripción precisa del material que compone al RE1/1. Los flujos de radiación del medio ambiente (en donde está inmerso el detector) se han obtenido a través de CMS y los han generado usando el paquete de Monte Carlo llamado FLUKA. Este paquete proporciona las energías cinéticas de las partículas incidentes y el ángulo de la radiación

## CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

---

del medio ambiente, donde se han considerado las condiciones de Run-2. Utilizando Geant4 hemos calculado la sensibilidad del RE1/1 a diferentes tipos de radiación, considerando como partículas de background los fotones, neutrones, electrones y positrones. Haciendo una convolución de la sensibilidad del detector con los flujos de energía, hemos calculado el Hit Rate en el detector RE1/1.

Los resultados de sensibilidad obtenidos en esta tesis pueden utilizarse con los respectivos flujos dentro de CMS para estudiar el impacto en otras áreas del sistema de muones.

Los resultados obtenidos tanto para sensibilidad como para el Hit Rate concuerdan con otros reportados en la literatura.





# Bibliografía

- [1] Salam, Abdus: *Fundamental Interactions*. AccessScience., 2020. <https://doi.org/10.1036/1097-8542.275600>.
- [2] Gordon, Kane: *Modern elementary particle physics: explaining and extending the standard model*. Cambridge University Press, 2017.
- [3] Woithe, Julia, Gerfried J Wiener y Frederik F Van der Veken: *Let's have a coffee with the standard model of particle physics!* Physics Education, 52(3):034001, 2017. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/aa5b25>.
- [4] José, Cobián: *El modelo estándar de la física de partículas*. Sociedad Nuclear Española, nota de divulgación técnica, NT-01/18, páginas 1–13, 2018.
- [5] Antonio, Moreira Marco: *El modelo estándar de la física de partículas*. Revista brasileña de Enseñanza de física, páginas 1–16, 2009, 31(1): 1306. <http://moreira.if.ufrgs.br/modeloestandar.pdf>.
- [6] Ramírez Guadarrama, Dalia Lucero: *Simulación de un detector de cámara de placas resistivas*. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis, páginas 1–73, 2018. <http://132.248.9.195/ptd2018/abril/0772295/0772295.pdf>.
- [7] Lippmann, Christian y Werner Riegler: *Detector physics of resistive plate chambers*. Tesis de Doctorado, 2002. [http://home.iitb.ac.in/~pradeepsarin/students/tether/NiladriSaurabh\\_20123/RPC/frankfurt\\_thesis\\_RPC\\_physics.pdf](http://home.iitb.ac.in/~pradeepsarin/students/tether/NiladriSaurabh_20123/RPC/frankfurt_thesis_RPC_physics.pdf).
- [8] Filip, Thyssen: *Performance of the Resistive Plate Chambers in the CMS Experiment*. Journal of Instrumentation, 7(01):C01104, 2012.
- [9] Wuyckens, Sophie, Andrea Giammanco, Eduardo Cortina Gil y Pavel Demin: *A portable muon telescope based on small and gas-tight resistive plate chambers*. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 377(2137):20180139, 2019.
- [10] Alejandro, Del Rio Viera Manuel: *Charge studies on multigap resistive plate chambers*, 2020, Tesis de maestría. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/10167>.
- [11] Leo, William R: *Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [12] Thyssen, Filip: *Commissioning, operation and performance of the CMS resistive plate chamber system*. Tesis de Doctorado, Ghent University, 2014. <https://core.ac.uk/download/pdf/55767675.pdf>.

- [13] Collaboration, CMS *y cols.*: *The CERN Large Hadron Collider: Accelerator and Experiments*. JINST, 803:S08001, 2008.
- [14] Collaboration, CMS *y cols.*: *Performance and operation of the CMS electromagnetic calorimeter*. Journal of Instrumentation, 5(03):T03010, 2010.
- [15] Man, J *y cols.*: *CMS technical design report for the phase 1 upgrade of the hadron calorimeter*. Informe técnico, Fermi National Accelerator Lab.(FNAL), Batavia, IL (United States), 2012, CERN-LHCC-2012-015 ; CMS-TDR-10.
- [16] Khachatryan, CMS Collaboration, V. *y cols.*: *Technical proposal for the phase-II upgrade of the Compact Muon Solenoid, 2015*, 2017, CERN-LHCC-2015-10, CMS-TDR-15-02.
- [17] Sirunyan, Albert M. *y cols.*: *Particle-flow reconstruction and global event description with the CMS detector*. JINST 12 (2017) P10003, arXiv:1706.04965, página 86, 2017.
- [18] Collaboration, CMS: *The CMS muon project: Technical Design Report. 1997*. <http://cds.cern.ch/record/343814>.
- [19] Musenich, R., O. Sharif, Danek Kotlinski, E. Gasanov, E. Gülmez, V. Genchev, L. Glonti, A. Rácz, N. Djaoshvili, N. Colino *y cols.*: *CMS TriDAS project: Technical Design Report, Volume 1: The Trigger Systems*. Informe técnico, CMS-TDR-006-1, 2000.
- [20] CMS-TDR-016, CMS Collaboration. CERN LHCC 2017 012: *The phase-2 upgrade of the CMS muon detectors*. Informe técnico, 2017.
- [21] Abbrescia, Marcello, Vladimir Peskov y Paulo Fonte: *Resistive gaseous detectors: designs, performance, and perspectives*. John Wiley & Sons, 2018.
- [22] Pia, Maria Grazia y Georg Weidenspointner: *Monte Carlo simulation for particle detectors*. arXiv:1208.0047, 2012.
- [23] Lippmann, Christian y Werner Riegler: *Simulation of space charge effects in resistive plate chambers*. IEEE Transactions on Nuclear Science, 50(4):797–802, 2003.
- [24] Tang, ShiChao y David M Smith: *GEANT4 simulations of gamma-ray emission from accelerated particles in solar flares*. The Astrophysical Journal, 721(2):1174, 2010.
- [25] Böhlen, T.T., F. Cerutti, M.P.W. Chin, A. Fass $\tilde{A}$ <sup>2</sup>, A. Ferrari, P.G. Ortega, A. Mairani, P.R. Sala, G. Smirnov y V. Vlachoudis: *The FLUKA Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications*. Nuclear Data Sheets, 120:211–214, 2014, ISSN 0090-3752. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0090375214005018>.
- [26] Gelmi, Andrea, Elena Voevodina, CMS Collaboration *y cols.*: *Background rate study for the CMS improved-RPC at HL-LHC using GEANT4*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 936:430–432, 2019.
- [27] O. Bouhali, A. Castañeda, S. S. Chauhan T. Kamon Y. Kang S. Kumar y A.K. Viridi: *Modeling the triple-GEM detector response to background particles for the CMS experiment*. CMS Draft Note, página 14, 2021.

- [28] Abbaneo, Duccio: *Impact of the Radiation Background on the CMS muon high-eta upgrade for the LHC high luminosity scenario*. PoS, página 086, 2014, PoS TIPP2014 (2014) 086.
- [29] C. Uribe Estrada, S. Carpynteiro Bernardino *y cols.*: *RPC radiation background simulations for the high luminosity phase in the CMS experiment*. Journal of Instrumentation, 14(09):C09045, 2019.
- [30] C. Uribe Estrada , A. Castaneda, Del Rio Viera Manuel Alejandro, S. Carpinteyro.: *Simulation Studies of the impact of the CMS radiation environment on RPC detectors*. Proceedings of Science -LHCP-, 2019. DOI:10.22323/1.350.0049.
- [31] Z. Liu, R. Beyer, C. Uribe Estrada *y cols.*: *Novel low resistivity glass: MRPC detectors for ultra high rate applications*. Nuclear Inst. and Methods in Physics Reseach, A 959 (2020) 163483.