



Universidad Nacional de La Plata  
Facultad de Ciencias Exactas  
Departamento de Física

---

# Búsqueda de Supersimetría con producción de Higgs en el detector ATLAS (CERN-LHC)

---

Trabajo de Tesis Doctoral

Gonzalo E. Orellana

Director  
Dr. Hernán P. Wahlberg  
Co-Director  
Dr. Fernando Monticelli

Marzo 2022



# Índice general

<b>Introducción</b>	<b>3</b>
<b>1. Modelo Estándar y Supersimetría</b>	<b>5</b>
1.1. Modelo estándar de la física de partículas . . . . .	5
1.2. Supersimetría . . . . .	5
<b>2. LHC y detector ATLAS</b>	<b>7</b>
<b>3. Reconstrucción e identificación de objetos físicos</b>	<b>9</b>
<b>Reconstrucción e identificación de objetos físicos</b>	<b>9</b>
3.1. Electrones y fotones . . . . .	9
3.1.1. Reconstrucción . . . . .	10
3.1.2. Identificación . . . . .	12
3.1.3. Aislamiento . . . . .	13
3.2. Muones . . . . .	16
3.3. Jets . . . . .	17
3.3.1. Jets provenientes de quarks $b$ ( $b$ -jets) . . . . .	19
3.4. Energía transversa faltante . . . . .	19
<b>4. Eficiencia del trigger de fotones</b>	<b>21</b>
<b>5. Estrategia de búsqueda de SUSY con fotones, jets y MET en el estado final</b>	<b>23</b>
<b>6. Resultados e interpretación del análisis</b>	<b>25</b>
<b>7. Conclusión</b>	<b>27</b>

Agradecimientos	29
Bibliografía	32

## To Do

- Siglas: ATLAS, SM, ID, EM
- Mencionar
  - electrones = positrones
  - leptones: sin tau
  - MET asociado a neutrinos y nueva fisica
- Definiciones
  - pile up, convención para escribirlo
  - Run 1, 2
  - prompt
  - crack region
  - barrel, endcap

## Citas

- newt: T. Cornelissen et al., Concepts, Design and Implementation of the ATLAS New Tracking (NEWT), ATL-SOFT-PUB-2007-007 (2007), url: <http://cds.cern.ch/record/1020106>
- Kalman: R. Frühwirth, Application of Kalman filtering to track and vertex fitting, Nucl. Instrum. Meth. A262(1987) 444.
- chi2: T. G. Cornelissen et al., The global chi2 track fitter in ATLAS, J. Phys. Conf. Ser.119(2008) 032013
- gsf: ATLAS Collaboration, Improved electron reconstruction in ATLAS using the Gaussian Sum Filter-based model for bremsstrahlung, ATLAS-CONF-2012-047, 2012, url: <https://cds.cern.ch/record/1383793>
- Cacciari: M. Cacciari and G. P. Salam, Pileup subtraction using jet areas, Phys. Lett. B659(2008) 119, arXiv:0707.1378 [hep-ph].
- silicon: ATLAS Collaboration, Performance of the ATLAS Silicon Pattern Recognition Algorithm in Data and Simulation at  $s=7\text{TeV}$ , ATLAS-CONF-2010-072 (2010), url: <http://cds.cern.ch/record/1383793>
- trt: ATLAS Collaboration, Particle Identification Performance of the ATLAS Transition Radiation Tracker, ATLAS-CONF-2011-128, 2011, url: <https://cds.cern.ch/record/1383793>.

- trimming: JHEP 02, 084 (2010), 0912.1342
- btag: ATLAS b-jet identification performance and efficiency measurement with tt-bar events in pp collisions at  $\sqrt{s}$  13 TeV, Eur. Phys. J. C 79 (2019) 970, arXiv:1907.05120, FTAG-2018-01

## Nota 1

Ciertas magnitudes no tiene sentido ponerlas explícitamente ya que no aportan mucho. Aún así el texto no debería quedar vago...

## Dudas

- Fotones convertidos dejan 2 depósitos en el EM o 1? Figura?
- En nuestro análisis los taus están como jets?
- Usamos los objetos baseline para calcular MET?

# Introducción

...





# Capítulo 1

## Modelo Estándar y Supersimetría

1.1. Modelo estándar de la física de partículas

1.2. Supersimetría



## Capítulo 2

# LHC y detector ATLAS

...



## Capítulo 3

# Reconstrucción e identificación de objetos físicos

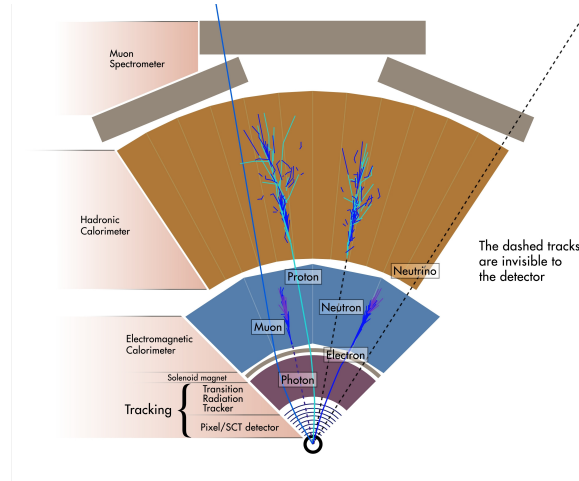
El diseño del detector ATLAS permite la reconstrucción e identificación de prácticamente todas las partículas producidas en la colisión  $pp$ . La mayoría de las partículas del SM son inestables por lo que decaen rápidamente en otras partículas estables. Esto reduce considerablemente las posibles partículas que llegan al detector, ya que solo van a ser aquellas que sean estables o con suficiente vida media, siendo estas principalmente:  $\gamma$ ,  $e^\pm$ ,  $\mu^\pm$ ,  $\nu$  y algunos hadrones como  $p$ ,  $n$ , piones y kaones. El diseño de los distintos subdetector permite aprovechar las características de cada una de ellas, haciendo que cada una de las partículas anteriores dejen señales distintivas, permitiendo su reconstrucción e identificación. La Figura 3.1 muestra un esquema de las distintas señales dejadas por cada una de las partículas en el detector ATLAS. Todos los procesos de reconstrucción descritos se realizan una vez que el evento pasó los requisitos del *trigger* y fue almacenado (*offline*).

### 3.1. Electrones y fotones

Los electrones y fotones producidos tanto en la colisión  $pp$  como aquellos producto del decaimiento de otras partículas, depositan la mayor parte de su energía en el ECAL. Estos depósitos están restringidos a un número de celdas vecinas cuyo conjunto se denomina *cluster*, y que tienen estructuras propias de la producción de estas partículas. Los depósitos que dejan ambas partículas son similares y con el objetivo de poder distinguirlos se utiliza además información del detector de trazas. Al ser el fotón una partícula neutra no deja traza en el ID, por lo que los *clusters* que no están asociados a trazas son considerados fotones, mientras que los que sí lo están son considerados electrones.

Procesos como la producción de pares ( $\gamma \rightarrow e^-e^+$ ) producto de la interacción de los fotones con el material del detector, pueden dejar trazas o depósitos que no corresponden con la reconstrucción de un fotón. El algoritmo de reconstrucción tiene en cuenta esto y puede reconstruir los vértices de conversión, por lo que los *clusters* asocia-

Figura 3.1: Esquema de los distintos tipos de señal que pueden dejar las partículas en el detector ATLAS [[[capaz puede omitirse esta image]]] [[[Imagen dummy, después busco una de mejor calidad]]]



dos a vértices de conversión son considerados fotones. Finalmente, ciertos procesos (ej.  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ ) pueden generar depósitos que erróneamente son reconstruidos como fotones o electrones [[[Me surge la duda: la idea es reconstruir a los pi0 como 2 fotones y no como 1, no? No llega a ser jet este decaimiento]]]. Para reducir la identificación errónea se aplican entonces una serie de criterios de identificación y aislamiento, basados en las formas de los depósitos de energía, que permiten discriminar estos procesos de los procesos *prompt* [[[Mirar comentario de prompt en la sección de ID]]].

Las técnicas de reconstrucción de electrones y fotones se realizan en paralelo y son similares, pudiendo ser descriptas simultáneamente.

### 3.1.1. Reconstrucción

La reconstrucción de electrones y fotones en el detector ATLAS se realiza utilizando un algoritmo para la reconstrucción de *clusters* dinámicos de tamaño variable, denominados *superclusters* [1]. Durante Run 1 el algoritmo reconstruía *clusters* de tamaño fijo [2–4], que si bien tenían una respuesta lineal energética y un establecimiento frente a pile-up, no permitía reconstruir eficientemente la energía de fotones *bremsstrahlung* o de electrones/positrones producto de la creación de pares. La implementación de *superclusters* durante el Run 2, junto con la calibración de la energía descripta en la Referencia [5] permite solucionar esto sin perder la linealidad y estabilidad de los *clusters* de tamaño fijo.

## Topo-clusters

El algoritmo comienza buscando las celdas en el ECAL y el HCAL con una señal<sup>1</sup> cuatro veces mayor al ruido esperado dadas las condiciones de luminosidad y *pileup* del Run 2. A partir de ellas agrega las celdas vecinas cuya señal sea dos veces mayor al ruido, que a su vez son utilizadas en la siguiente iteración del algoritmo, que se repite hasta que no haya más celdas adyacentes que cumplan este requisito. Finalmente se agregan todas las celdas vecinas a las celdas anteriores, independientemente de la intensidad de señal que tengan, formando lo que se denominan *topo-clusters* [4,6]. Los *topo-clusters* que compartan celdas son unificados, mientras que los *topo-clusters* que tengan dos máximos locales son divididos.

## Trazas y vértices de conversión

La reconstrucción de trazas se realiza utilizando un algoritmo de búsqueda de patrones de trazas estándar [7–9] en todo el ID. A su vez, utiliza los depósitos en el ECAL que presenten una forma compatible con la de una lluvia electromagnética para definir regiones de interés. En caso de que el algoritmo anterior falle, se utiliza en estas regiones otro algoritmo de búsqueda de trazas [10], permitiendo reconstruir trazas adicionales. Luego se realiza una serie de ajustes ( $\chi^2$  [11], GSF [12]) de las trazas permitiendo obtener correctamente los parámetros que la caracterizan. Finalmente las trazas son asociadas a los *topo-clusters* extrapolando a la misma desde el perigeo hasta la segunda capa del ECAL. Una traza se considera asociada con un *topo-cluster* si  $|\Delta\eta| < 0.05$  y  $-0.10 < q \cdot (\phi_{\text{traza}} - \phi_{\text{cluster}}) < 0.05$ , donde  $q$  es la carga de la traza. A su vez, el momento de la traza es escaleado para que coincida con al energía del *topo-cluster* asociado. Si múltiples trazas son asociadas a un mismo *topo-cluster* se clasifica a las mismas utilizando criterios de calidad, siendo la mejor clasificada la que se utiliza para reconstruir a los electrones.

Los vértices de conversión son reconstruidos a partir de pares de trazas con cargas de signo opuesto y consistentes con el decaimiento de una partícula sin masa. Adicionalmente se pueden reconstruir vértices de conversión a partir de una sola traza que no haya dejado señal en las capas más internas del ID. En ambos casos se busca que la traza tenga altas probabilidad de ser un electrón en el TRT [13] pero baja en el SCT. Es esperado que las trazas de los vértices de conversión estén muy cerca una de otra, en general compartiendo *hits*, haciendo que una de las trazas no llegue a reconstruirse. Para ello se utilizan trazas con requisitos de asociación a *topo-clusters* más relajados que los anteriormente descritos, y con distintos criterios de ambigüedad ante solapamiento. Finalmente los vértices son asociados a los *topo-clusters*, y en caso de múltiples vértices asociados a un mismo *topo-cluster* se prioriza aquellos reconstruidos a partir de dos trazas y cuyo radio sea menor.

---

<sup>1</sup>Para los *topo-clusters* electromagnéticos la medida de la señal se realiza en la escala electromagnética, que es la escala adecuada para medir los depósitos de energía de las partículas producidas en lluvias electromagnéticas de forma correcta

## Superclusters

La reconstrucción de los *superclusters* para electrones y fotones se realiza de forma independiente y en dos etapas: primero se encuentran los *topo-clusters* semilla [[[mejor traduccion de seed?]]] y luego se le adjuntan los *topo-clusters* satélites producidos generalmente por *bremsstrahlung* o por la división de *topo-clusters*. El algoritmo comienza ordenando todos los *topo-clusters* por  $E_T$  y verifica si pasan los requerimientos para ser un *topo-clusters* semilla (comenzando por los más energéticos). En el caso de los electrones el requisito es tener  $E_T$  mayor a 1 GeV y una traza asociada con al menos cuatro *hits* en el SCT, mientras que el de los fotones es tener  $E_T$  mayor a 1.5 GeV. Cuando un *topo-clusters* pasa estos requisitos se busca sus *topo-clusters* satélites asociados y el mismo no puede ser utilizado como satélite en las siguientes iteraciones. Los *topo-clusters* satélites son aquellos que se encuentran dentro de una ventana de  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.075 \times 0.125$  alrededor del centro del *topo-cluster* inicial. Para electrones además se consideran *topo-clusters* satélites aquellos que se encuentran dentro de una ventana de  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.125 \times 0.3$  cuya traza mejor ajustada coincide con la traza mejor ajustada del *topo-cluster* inicial. Para fotones convertidos además se consideran *topo-clusters* satélites aquellos que compartan el vértice de conversión con el *topo-cluster* inicial.

Para limitar la sensibilidad de los *superclusters* al *pileup*, el tamaño de cada *topo-cluster* constituyente es restringido a un máximo de 0.075 (0.125) en la dirección de  $\eta$  en la región *barrel* (*endcap*). Como el algoritmo se utiliza de forma independiente tanto para electrones como para fotones, puede ocurrir que un mismo *supercluster* se asocie tanto a un electrón como a un fotón. En ese caso se utilizan una serie de criterios de ambigüedad que permiten determinar si el candidato es un electrón o un fotón. En el caso que aún no pasen los criterios de ambigüedad el candidato es guardado como electrón y fotón simultáneamente, pero marcados como ambiguos y es decisión de cada análisis incluirlos en el mismo [[[posible pie para hablar del overlap removal OR]]].

Finalmente se calibra la energía de los *superclusters*, las trazas son nuevamente ajustadas pero ahora utilizando los *superclusters* anteriores, y la energía es recalibrada teniendo en cuenta este nuevo último ajuste siguiendo el procedimiento descrito en la Referencia [5].

### 3.1.2. Identificación

Como se mencionó anteriormente, distintos criterios de identificación son utilizados para poder discriminar los objetos *prompt* [[[No entiendo tu comentario, la identificación son criterios de calidad del objeto que ya se clasificó como electrón o fotón. En el paper EGAM-2018-01 se utiliza la jerga prompt vs background para motivar la identificación. Aquellos e/y que vienen de decaimientos prompt se depositan en el ECAL y los podemos considerar prompt, aquellos que vienen en otro tipo de decaimiento supongo que estarán contenidos dentro de los jets... EDIT: Revisar mejor definicion de prompt]]] de aquellos que no lo son. Para ello se definen una serie de variables basadas en la información del calorímetro y del ID, que mediante distintas técnicas permiten la correcta



identificación de los objetos. Finalmente se definen diferentes puntos de trabajo (*Working Points*, WP) que permiten mejorar la pureza de los objetos seleccionados al costo de tener una menor eficiencia de selección.

La identificación de electrones tiene como principal objetivo discriminar los electrones *prompt* de los fotones convertidos, de jets que depositaron energía en el ECAL y de electrones producidos en el decaimiento de hadrones de sabor pesado. Esta identificación se basa en un método de likelihood que utiliza algunas de las variables descriptas en la Tabla 3.1, y cuyas pdfs se obtienen de eventos con decaimientos de  $J/\Psi$  y  $Z$  para electrones de bajo y alto  $E_T$  respectivamente [14]. Para electrones se definen tres WP, *Loose*, *Medium* y *Tight*, cuyas eficiencias de identificación promedio son 93 %, 88 % y 80 % respectivamente.

La identificación de fotones esta diseñada para seleccionar eficientemente fotones *prompt* y rechazar los fotones falsos provenientes de jets, principalmente del decaimiento de mesones livianos ( $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ ). La identificación se basa en una serie de cortes rectangulares sobre las variables presentes en la Tabla 3.1. Las variables que utilizan las primeras capas del ECAL son esenciales para discriminar los decaimientos del  $\pi^0$  en dos fotones muy colimados, ya que los depósitos de energía de este decaimiento se extienden en más celdas de esta capa en comparación con el depósito de un fotón real. En la Figura 3.2 se puede observar la comparación de ambos procesos. Para la identificación de fotones también se definen tres WPs, *Loose*, *Medium* y *Tight*, cada uno inclusivo con respecto al anterior, y en la Tabla 3.1 se muestran las variables empleadas por cada uno de ellos. Los WPs *Loose* y *Medium* fueron utilizados por los algoritmos del trigger durante la toma de datos del Run 2 para seleccionar eventos con uno o dos fotones. Como los depósitos de energía varían debido a la geometría del calorímetro, los tres WPs fueron optimizados para diferentes valores de  $|\eta|$ , y adicionalmente la selección *Tight* fue optimizada para distintos valores de  $E_T$ . Los depósitos de energía de los fotones convertidos difiere de los no convertidos, debido a la separación angular entre el  $e^-$  y el  $e^+$  que se amplifica por el campo magnético, y debido a la interacción de los pares con capas más altas del calorímetro, permitiendo optimizar la selección *Tight* de forma separada para fotones convertidos de los no convertidos. Esto no fue posible para las selecciones *Loose* y *Medium* ya que la información que utilizan no permite saber si un fotón es convertido o no. La optimización fue realizada a bajo  $E_T$  utilizando simulaciones de decaimientos radiativos del bosón  $Z$  junto con datos con eventos con bosones  $Z$ , y a alto  $E_T$  con simulaciones de producción de fotones inclusiva y jets. La eficiencia de identificación para la selección *Tight* supera el 80 % para fotones con  $E_T > 20$  GeV [1].

### 3.1.3. Aislamiento

Criterios de aislamiento se pueden aplicar sobre los fotones y electrones para aumentar aún más calidad de selección de los mismos. A su vez, la presencia de otros objetos cerca del fotón o el electrón puede interferir en la correcta reconstrucción de las variables cinemáticas del mismo, como su energía. El aislamiento de estos objetos se puede cuantizar definiendo variables no solo para los depósitos de energía, sino también para las

Tabla 3.1: Variables utilizadas en la definición de los WPs de identificación de fotones, *Loose* (L), *Medium* (M) y *Tight* (T). [[[Está bien no poner las variables de electrones? Entender y traducir bien algunas variables. Considerar: For variables calculated in the first EM layer, if the cluster has more than one cell in the phi direction at a given eta, the two cells closest in phi to the cluster barycentre are merged and the definitions below are given in terms of this merged cell.]]]

Categoría	Nombre	Descripción	L	M	T
Fuga hadrónica	$R_{\text{had}_1}$	Fracción de $E_T$ en la primer capa del HCAL con respecto al $E_T$ total del <i>cluster</i> (para $ \eta  < 0.8$ y $ \eta  > 1.37$ )	✓	✓	✓
	$R_{\text{had}}$	Fracción de $E_T$ en el HCAL con respecto al $E_T$ total del <i>cluster</i> (para $0.8 <  \eta  < 1.37$ )	✓	✓	✓
2 <sup>da</sup> capa del ECAL	$w_{\eta 2}$ [[[va el 2?]]]	Ancho lateral de la lluvia: $\sqrt{\frac{\sum E_i \eta_i^2}{\sum E_i} - \left(\frac{\sum E_i \eta_i}{\sum E_i}\right)^2}$ [[[esta bien el cuadrado del primer termino?]]], donde la suma es calculada en una ventana de $3 \times 5$ celdas	✓	✓	✓
	$R_\eta$	Fracción de la suma de las energías contenida en un rectángulo de $\eta \times \phi = 3 \times 7$ celdas con respecto a un rectángulo $7 \times 7$ celdas, ambos centrados en la celda más energética	✓	✓	✓
	$R_\phi$	Fracción de la suma de las energías contenida en un rectángulo de $\eta \times \phi = 3 \times 3$ celdas con respecto a un rectángulo $3 \times 7$ celdas, ambos centrados en la celda más energética	✗	✗	✓
1 <sup>er</sup> capa del ECAL	$E_{\text{ratio}}$	Ratio of the energy difference between the maximum energy deposit and the energy deposit in a secondary maximum in the cluster to the sum of these energies	✗	✓	✓
	$w_{s \text{ tot}}$	Ancho lateral total de la lluvia: $\sqrt{\frac{\sum E_i (i - i_{\text{máx}})^2}{\sum E_i}}$ , donde la suma se realiza sobre todas las celdas contenidas en una ventana de $\Delta\eta \approx 0.0625$ e $i_{\text{máx}}$ es la celda con mayor energía [[[alto de la ventana?]]]	✗	✗	✓
	$w_{s 3}$	Ancho lateral de la lluvia: $\sqrt{\frac{\sum E_i (i - i_{\text{máx}})^2}{\sum E_i}}$ , donde la suma se realiza sobre todas las celdas contenidas en una ventana de tres celdas alrededor de la celda de mayor energía, $i_{\text{máx}}$	✗	✗	✓
	$f_{\text{side}}$	Energy fraction outside core of three central cells, within seven cells [[[entender y traducir bien]]]	✗	✗	✓
	$\Delta E_s$	Difference between the energy of the cell associated with the second maximum, and the energy reconstructed in the cell with the smallest value found between the first and second maxima	✗	✗	✓
	$f_1$	Fracción de energía medida en la primer capa del ECAL con respecto a la energía total del <i>cluster</i> electromagnético	✗	✗	✓

Figura 3.2: Depósitos de energía característicos de un fotón aislado (izquierda) y un  $\pi^0$  (derecha) [[[Imagen dummy, después busco una de mejor calidad]]]

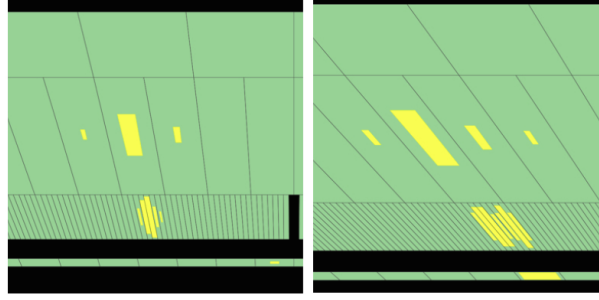
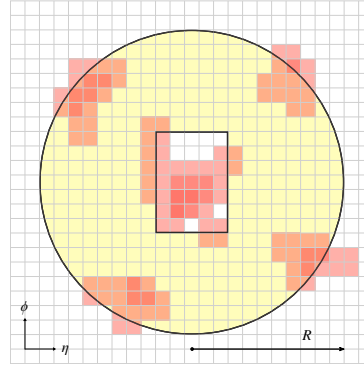


Figura 3.3: Esquema del cono utilizado para el cálculo de la variable de aislamiento calorimétrico [[[Imagen dummy, después busco una de mejor calidad]]]



trazas.

La variable de aislamiento calorimétrico [9] ( $E_T^{\text{coneXX}}$ ) se define como la suma de la energía transversa de todas las celdas contenidas en un cono centrado en el *topo-cluster*, y cuyo radio  $\Delta R$ <sup>2</sup> (en el plano  $\eta - \phi$ ) es igual a XX. La contribución energética del objeto a aislar se sustrae ignorando las celdas contenidas en un rectángulo en el centro del cono, y cuyos lados miden  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 5 \times 7$ . Las filtraciones energéticas del candidato fuera del rectángulo son tenidas en cuenta junto con los efectos de pile-up [15]. Para electrones se utiliza un cono de radio  $\Delta R = 0.2$  ( $E_T^{\text{cone20}}$ ), mientras que para fotones se utiliza uno de  $\Delta R = 0.2$  ( $E_T^{\text{cone20}}$ ) o  $\Delta R = 0.4$  ( $E_T^{\text{cone40}}$ ) dependiendo del WP. La Figura 3.3 muestra un esquema del cono utilizado para construir la variable  $E_T^{\text{coneXX}}$ .

La variable de aislamiento de trazas ( $p_T^{\text{coneXX}}$ ) se define como la suma del momento transversa de todas las trazas contenidas dentro de un cono centrado en la traza del electrón o en la dirección del cluster del fotón convertido. La traza asociada al electrón o al fotón convertido son excluidas de esta suma, al igual que aquellas que no pasen una serie de criterios de calidad mínima. Como los electrones producidos en el decaimiento de partículas pesadas pueden estar en cercanía de otras partículas, la variable de aislamiento de trazas utiliza un cono de radio variable, cuyo tamaño se reduce a alto  $p_T$ . La variable

---

<sup>2</sup> $\Delta R = \sqrt{\Delta\phi^2 + \Delta\eta^2}$

Tabla 3.2: Definición de los WPs de aislamiento para fotones y electrones. [[[los nombres no llevan el FixedCut o FC?]]]

Objeto	WP	Aislamiento calorimétrico	Aislamiento de trazas
Fotón	Tight	$E_T^{\text{cone40}} < 0.022 \times E_T + 2.45 \text{ GeV}$	$p_T^{\text{cone20}}/E_T < 0.05$
	TightCaloOnly	$E_T^{\text{cone40}} < 0.022 \times E_T + 2.45 \text{ GeV}$	
Electrón	Loose	$E_T^{\text{cone20}}/p_T < 0.2$	$p_T^{\text{varcone20}}/p_T < 0.15$

se denomina  $p_T^{\text{varconeXX}}$  donde XX es el radio máximo utilizado, que para el caso de los electrones es  $\Delta R_{\text{máx}} = 0.2$  ( $p_T^{\text{varcone20}}$ ). En el caso de los fotones el radio del cono mide  $\Delta R = 0.2$  ( $p_T^{\text{cone20}}$ ).

Se definen distintos WPs de aislamiento de electrones dependiendo de si se desea mantener constante la eficiencia o si se desea aplicar cortes fijos en las variables de aislamiento. Un ejemplo de WP de aislamiento para electrones es el *Loose* con una eficiencia de selección mayor a 90 % para electrones con  $E_T > 10 \text{ GeV}$  [1]. En el caso de fotones también se definen distintos WPs que pueden no utilizar todas las variables de aislamiento, como el caso del WP *FixedCutTightCaloOnly* que solo utiliza un corte en la variable  $E_T^{\text{cone}}$ . Las definiciones de los distintos WPs de interés para esta tesis se listan en la Tabla 3.2.

## 3.2. Muones

[[[Me gustaría poner algo de cuánto interactúan los muones con el detector, y algo de los muones cósmicos]]]

La reconstrucción de muones se realiza de forma independiente en el ID y en el MS. La información de los distintos subdetectores, que incluye a los calorímetros, se combina para formar a los objetos finales utilizados en los análisis [16]. La reconstrucción en el ID se realiza de la misma forma que con cualquier otra partícula cargada [7, 17]. La reconstrucción en el MS comienza con una búsqueda de patrones de *hits* para definir segmentos en cada cámara de muones, que luego son combinados con un ajuste de  $\chi^2$  global.

Luego se combina la información del ID, MS y los calorímetros, utilizando una serie de algoritmos que definen 4 tipos de muones dependiendo del subdetector que se utilizó en la reconstrucción:

- Muones Combinados (CB): reconstruidos en el ID y el MS de forma independiente, y luego mediante un ajuste se reconstruye una traza combinada.
- Muones Segmentados (ST): trazas del ID que al extrapolarlas al MS tienen asociadas un segmento en el MDT o el CSC. Se definen principalmente para reconstruir aquellos muones de bajo  $p_T$  o que caen en regiones del MS con baja aceptación.

- Muones Calorimétricos (CT): trazas del ID que están asociadas a depósitos de energía en el calorímetro compatibles con una partícula mínimamente ionizante. Este tipo de muones son los de menor pureza pero permite detectarlos en regiones donde el MS está parcialmente instrumentado.
- Muones Extrapolados (ME): reconstruidos utilizando solo el MS y requiriendo que hayan dejado traza en la región *forward* además de una mínima compatibilidad con el punto de interacción. Se definen principalmente para extender la aceptación a la región  $2.5 < |\eta| < 2.7$  donde el ID no llega a cubrir.

En caso de solapamiento entre los distintos tipos de muones se resuelve teniendo prioridad por los CB, luego por los ST y finalmente por los CT. Para los ME se priorizan aquellos muones con mejor calidad en el ajuste de la traza y mayor cantidad de *hits*.

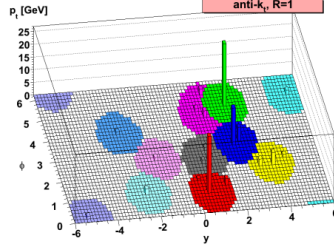
La identificación de muones se realiza con el objetivo de discriminar muones *prompt* de aquellos producidos principalmente en el decaimientos de piones y kaones, manteniendo una alta eficiencia y garantizando una medida robusta de su momento. Los muones producidos en el decaimiento de hadrones cargados dejan una traza en el ID con una topología enroscada [[[retorcida? traducir mejor!]]] que genera discrepancias entre el momento reconstruido en el ID y el reconstruido en el MS. La identificación se realiza aplicando una serie de cortes en diferentes variables [16] obtenidas a partir del estudio de simulaciones de producción de pares de quarks *top*. Se definen cuatro WPS, *Loose*, *Medium*, *Tight*, y *High-pT*, para satisfacer las necesidades de los distintos análisis. Por ejemplo, la selección *Loose* está optimizada para reconstruir candidatos del decaimiento del bosón de Higgs, la selección *Medium* es la selección más genérica para todos los análisis, y la selección *High-pT* está orientada a búsquedas de resonancias de alta masa del  $Z'$  y  $W'$ .

Finalmente se definen criterios de aislamiento que permiten distinguir aquellos muones producidos en los decaimientos de los bosones  $Z$ ,  $W$  y Higgs que en general se producen de forma aislada, de aquellos producidos en los decaimientos semi-leptónicos que quedan embebidos en los *jets*. Para ello se definen siete WPS, utilizando las mismas variables de aislamiento calorimétrico y de trazas utilizadas para fotones y electrones ( $p_T^{\text{varcone30}}$  y  $E_T^{\text{cone20}}$ ).

### 3.3. Jets

Debido al confinamiento de color los quarks o gluones, que tienen carga de color no nula, no pueden existir libres en la naturaleza. Al producirse quarks o gluones en la colisión estos crean nuevas partículas de color para generar partículas de carga de color nula. Este proceso que se denomina hadronización, produce en el detector una cascada de partículas de forma similar a un cono alrededor de la partícula inicial, llamada *jet*. Como los jets están compuestos de un número elevado de partículas que a su vez dejan trazas y deposiciones de energía, es necesario utilizar algoritmos especiales que permitan reagrupar a todas esas señales en su respectivo jet de forma correcta.

Figura 3.4: Esquema de agrupamiento de *topo-clusters* realizado por el algoritmo *anti- $k_t$*  [[[Imagen dummy, después busco una de mejor calidad]]]



La reconstrucción de los jets comienza a partir de los depósitos de energía en el calorímetro, generando *topo-clusters* de la misma forma que para electrones y fotones <sup>3</sup> [4]. Luego los *topo-clusters* son combinados mediante un algoritmo denominado *anti- $k_t$*  [18] que realiza los siguientes pasos:

- Calcula la ‘distancia’ de todos los *topo-clusters* entre sí, y de cada *topo-cluster* con el haz:

$$d_{ij} = \min(p_{T,i}^{-2}, p_{T,j}^{-2}) \frac{\Delta_{ij}^2}{R^2} \quad (3.1)$$

$$d_{iB} = p_{T,i}^{-2} \quad (3.2)$$

Donde  $\Delta_{ij}^2 = \Delta\phi_{ij}^2 + \Delta\eta_{ij}^2$  y  $R$  es un parámetro que asociado al radio del cono del jet a reconstruir, cuyo valor para el actual análisis es de 0.4

- Si el mínimo entre todas las distancias anteriormente calculadas es  $d_{iB}$ , se clasifica al *topo-cluster*  $i$  como un jet, y se lo descarta de sucesivas iteraciones
- Si el mínimo entre todas las distancias anteriormente calculadas es  $d_{ij}$ , los *topo-cluster*  $i$  y  $j$  son combinados, se vuelven a calcular todas las distancias con este nuevo *topo-cluster* y se itera nuevamente

Este algoritmo tiende a unificar las partículas *soft* con las *hard* y separar a las partículas *hard* entre sí, formando conos de radio  $R$  que van a resultar útiles para determinar el solapamiento con otros objetos reconstruidos del evento. La Figura 3.4 muestra esquemáticamente como el algoritmo *anti- $k_t$*  tiende a agrupar los distintos *topo-clusters*. Jets provenientes de quarks o gluones son llamados en general *small- $R$*  jets y se utiliza un  $R = 0.4$  para su reconstrucción. En cambio, los jets que representan partículas masivas decayendo hadrónicamente son llamados *large- $R$*  y utilizan un  $R = 1$ .

<sup>3</sup>En este caso los jets pueden ser calibrados tanto en la escala electromagnética como en la hadrónica (escala LCW), la cual tiene en cuenta las diferencias entre las interacciones electromagnéticas y hadrónicas en el detector ATLAS

A continuación los jets pasan por una serie de correcciones y calibraciones antes de reconstruir el objeto final para los análisis. Primero se remueve la contribución por pile-up, en el caso de los *large-R* jets afecta principalmente a las distribuciones angulares que son necesarias para la reconstrucción de su masa invariante, y se remueve utilizando una técnica denominada *grooming* descrita en la Referencia [19]. Para los *small-R* jets primero se realiza una corrección del origen de su vértice y luego se suprime la contribución por pile-up utilizando métodos que tienen en cuenta la densidad de energía de pile-up [20] junto con variables asociadas a las trazas y al vértice primario [21] [[[mencionar JVT, JVF?]]]. A continuación se calibra la energía del jet utilizando simulaciones de MC. Esto es necesario debido a que gran parte del jet es invisible al detector, por ejemplo cuando el jet se encuentra en las zonas del mismo donde la sensibilidad es baja. [[[hadronic showers inherently rely on interactions with the strong force to start electromagnetic cascades, typically via the creation of  $\pi^0$  and  $p_{\text{imp}}$ . However, these strong interactions result in a substantial amount of energy going into splitting nuclei, and thus overcoming the binding energy. This energy is not observed]]]. La escala de energía del jet (*Jet Energy Scale*, JES) [22] calcula un factor de respuesta en bins de  $|\eta|$  y  $p_T$  utilizando simulaciones de MC, y que al aplicarlo a los datos permite la corrección en energía de los jets. Para los *large-R* jets se aplica a su vez una corrección similar en la masa necesaria para la correcta reconstrucción de su masa invariante. Los *small-R* jets por su parte pasan por una calibración (*Global Sequential Calibration*, GSC) que mejoran la resolución de energía del jet (*Jet Energy Resolution*, JER). Finalmente se realiza una corrección *in situ* aplicada exclusivamente a los datos.

### 3.3.1. Jets provenientes de quarks $b$ ( $b$ -jets)

Los decaimientos de los hadrones pesados están gobernados generalmente por el hadrón más pesado en la cascada del decaimiento. Un hadrón  $b$  generalmente decae a través de una cascada a un hadrón  $c$ , que a su vez decae a un hadrón  $s$ , etc. Esto genera la existencia de múltiples vértices secundarios, que junto con la información de las trazas y la elevada vida media de los hadrones  $b$ , son utilizados por distintos algoritmos para poder distinguir los hadrones  $b$  de hadrones con sabores más livianos ( $b$ -tagging). Algunos ejemplos de algoritmos [23] son el MV2 basado en un *boosted decision tree* y compuesto de clasificadores de bajo nivel, y el DL1 basado en una red neuronal profunda. Para cada algoritmo se definen WPs con distintas eficiencias de selección, que a mayor eficiencia mayor es la probabilidad de identificar otros tipos de jets erróneamente como  $b$ -jets. Con el WP de 77% del algoritmo MV2 (DL1) 1 de cada 5 (5)  $c$ -jets, 1 de cada 15 (14)  $\tau$ -jets y 1 de cada 110 (130) jets livianos son identificados erróneamente como  $b$ -jets [23].

## 3.4. Energía transversa faltante

Como se mencionó en [[[definición MET]]], el momento transverso faltante se utiliza como un sustituto para obtener el momento de las partículas que prácticamente no



interactúan con el detector, por ejemplo neutrinos o partículas más allá del SM. El momento en la dirección del haz que acarrea cada partón previo a la colisión es desconocido, pero en la dirección transversa al haz se puede considerar que es nulo. Por conservación del momento se puede deducir que luego de la colisión la suma de los momentos en el plano transverso de todas las partículas producidas debería ser nulo, y en caso de no serlo puede ser un indicio de una partícula que escapó la detección. La reconstrucción del momento transverso faltante se basa en esta conservación y se define como menos la suma de los momentos transversos de todas las partículas observadas en el evento. En esta suma se incluyen los electrones, muones, fotones, taus decayendo hadrónicamente y jets reconstruidos con los métodos descritos en las secciones anteriores. Además se incluye un termino (*soft*) que tiene en cuenta el momento en la traza de las partículas que dejaron señal en el ID pero que no llegaron a reconstruirse. Quedando la definición del vector momento transverso faltante como [24]:

$$\mathbf{E}_T^{\text{miss}} = - \sum_i \mathbf{p}_T^{e_i} - \sum_i \mathbf{p}_T^{\gamma_i} - \sum_i \mathbf{p}_T^{\tau_i} - \sum_i \mathbf{p}_T^{j_i} - \sum_i \mathbf{p}_T^{\mu_i} - \sum_i \mathbf{p}_T^{\text{Soft}_i} \quad (3.3)$$

En general no se utilizan las componentes de este vector sino que se utiliza su módulo ( $E_T^{\text{miss}}$ ) y su ángulo ( $\phi^{\text{miss}}$ ), y cuando se menciona al momento transverso faltante se está haciendo referencia a su módulo. Otra variable que se utiliza además es  $\Sigma E_T$  que se define como la suma del módulo de los momentos de todas las partículas anteriormente consideradas. Cabe aclarar que esta definición introduce un sesgo a tener  $E_T^{\text{miss}}$  no nula en eventos donde no se produjo ninguna partícula no interactuante, debido a la incorrecta o insuficiente reconstrucción de todos los objetos presentes en el evento.

Como la reconstrucción se realiza de forma independiente para cada objeto, puede ocurrir que dos objetos distintos compartan algunas celdas calorimétricas. Para evitar el doble conteo, se define el siguiente orden de prioridad: electrones, fotones, taus y jets [25, 26]. Si alguna de estas partículas comparte celdas con otra de una prioridad mayor, la misma se elimina del cálculo de  $E_T^{\text{miss}}$ . Los muones son principalmente reconstruidos en el ID y el MS, por lo que el solapamiento con las demás partículas es mínimo y salvo algunos casos particulares ninguno es descartado. Muones no aislados que se solapan con los jets, jets que se solapan mínimamente con otros objetos o jets reconstruidos a partir de un depósito de energía de muones o de pile-up tienen un tratamiento especial descrito en la Referencia [24].

Los objetos que se incluyen en el cálculo de  $E_T^{\text{miss}}$  dependen de la selección de cada análisis, en el caso del presente análisis la selección base utilizada está descrita en la Sección [[[sección donde describo la selección baseline]]]. En el término *Soft* se incluyen solamente aquellas trazas provenientes del vértice principal que no estén asociadas las partículas anteriormente seleccionadas. Los depósitos de partículas neutras *soft* no se incluyen en este término ya que en su mayoría son producto del *pile-up* y su inclusión reduce el desempeño en la reconstrucción de  $E_T^{\text{miss}}$ .



## Capítulo 4

### Eficiencia del trigger de fotones

...



## Capítulo 5

**Estrategia de búsqueda de SUSY con  
fotones, jets y MET en el estado final**

...



## Capítulo 6

### Resultados e interpretación del análisis

...



## Capítulo 7

## Conclusión

...





# Agradecimientos

...



# Bibliografía

- [1] ATLAS Collaboration. Electron and photon performance measurements with the ATLAS detector using the 2015–2017 LHC proton–proton collision data. *JINST*, 14:P12006, 2019.
- [2] ATLAS Collaboration. Measurement of the photon identification efficiencies with the ATLAS detector using LHC Run-1 data. *Eur. Phys. J. C*, 76:666, 2016.
- [3] ATLAS Collaboration. Electron and photon energy calibration with the ATLAS detector using LHC Run 1 data. *Eur. Phys. J. C*, 74:3071, 2014.
- [4] W Lampl, S Laplace, D Lelas, P Loch, H Ma, S Menke, S Rajagopalan, D Rousseau, S Snyder, and G Unal. Calorimeter Clustering Algorithms: Description and Performance. Technical Report ATL-LARG-PUB-2008-002. ATL-COM-LARG-2008-003, CERN, Geneva, Apr 2008.
- [5] ATLAS Collaboration. Electron and photon energy calibration with the ATLAS detector using 2015–2016 LHC proton–proton collision data. *JINST*, 14:P03017, 2019.
- [6] ATLAS Collaboration. Topological cell clustering in the ATLAS calorimeters and its performance in LHC Run 1. *Eur. Phys. J. C*, 77:490, 2017.
- [7] newt.
- [8] ATLAS Collaboration. Measurement of the photon identification efficiencies with the ATLAS detector using LHC Run 2 data collected in 2015 and 2016. *Eur. Phys. J. C*, 79:205, 2019.
- [9] ATLAS Collaboration. Electron reconstruction and identification in the ATLAS experiment using the 2015 and 2016 LHC proton–proton collision data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV. *Eur. Phys. J. C*, 79:639, 2019.
- [10] Kalman.
- [11] chi2.
- [12] gsf.

- [13] trt.
- [14] ATLAS Collaboration. Electron efficiency measurements with the ATLAS detector using 2012 LHC proton–proton collision data. *Eur. Phys. J. C*, 77:195, 2017.
- [15] Cacciari.
- [16] ATLAS Collaboration. Muon reconstruction performance of the ATLAS detector in proton–proton collision data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV. *Eur. Phys. J. C*, 76:292, 2016.
- [17] silicon.
- [18] Matteo Cacciari, Gavin P. Salam, and Gregory Soyez. The anti- $k_t$  jet clustering algorithm. *JHEP*, 04:063, 2008.
- [19] trimming.
- [20] ATLAS Collaboration. Jet energy scale measurements and their systematic uncertainties in proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector. *Phys. Rev. D*, 96:072002, 2017.
- [21] ATLAS Collaboration. Performance of pile-up mitigation techniques for jets in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV using the ATLAS detector. *Eur. Phys. J. C*, 76:581, 2016.
- [22] ATLAS Collaboration. Jet energy scale and resolution measured in proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector. 2020.
- [23] btag.
- [24] ATLAS Collaboration. Performance of missing transverse momentum reconstruction with the ATLAS detector using proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV. *Eur. Phys. J. C*, 78:903, 2018.
- [25] ATLAS Collaboration. Performance of missing transverse momentum reconstruction in proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with ATLAS. *Eur. Phys. J. C*, 72:1844, 2012.
- [26] ATLAS Collaboration. Performance of algorithms that reconstruct missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 8$  TeV proton–proton collisions in the ATLAS detector. *Eur. Phys. J. C*, 77:241, 2017.