



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

Introducción	3
1. Modelo Estándar y Supersimetría	5
1.1. Modelo estándar de la física de partículas	5
1.2. Supersimetría	5
2. LHC y detector ATLAS	7
3. Reconstrucción e identificación de objetos físicos en el detector ATLAS	9
Reconstrucción e identificación de objetos físicos en el detector ATLAS	9
3.1. Electrones y fotones	9
3.1.1. Reconstrucción	10
3.1.2. Identificación	11
3.1.3. Aislamiento	12
3.2. Muones	13
3.3. Jets	14
3.3.1. Jets provenientes de quarks b (b -jets)	15
3.4. Energía transversa faltante	15
4. Eficiencia del trigger de fotones	17
5. Estrategia de búsqueda de SUSY con fotones, jets y MET en el estado final	19
6. Resultados e interpretación del análisis	21
7. Conclusión	23

Agradecimientos	25
Bibliografía	28

To Do

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

Citas

- Kalman: R. Frühwirth, Application of Kalman filtering to track and vertex fitting, Nucl. Instrum. Meth. A262(1987) 444.
- Cacciari: M. Cacciari and G. P. Salam, Pileup subtraction using jet areas, Phys. Lett. B659(2008) 119, arXiv:0707.1378 [hep-ph].
- 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>
- 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/1184381>

Nota 1

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

Dudas

- Fotonos 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 en el detector ATLAS



El diseño del detector ATLAS permite la reconstrucción e identificación de prácticamente todas las partículas producidas en la colisión pp . Dada la energía de colisión entregada por el LHC, es posible producir todas las partículas del SM. Las partículas que tienen una vida media muy corta, decaen antes de llegar a la parte más interna del detector y se detectan los productos de su decaimiento. Teniendo en cuenta esto, se reduce considerablemente las posibles partículas que llegan al detector, ya que solo van a ser aquellas que sean estables o con suficiente vida media. Estas partículas consisten prácticamente en: γ , e^\pm , μ^\pm , ν y algunos hadrones como p , n , piones y kaones. El diseño de los distintos subdetectores permite aprovechar las características de cada una de ellas, permitiendo su reconstrucción e identificación. La reconstrucción se realiza una vez que el evento pasó los requisitos del *trigger* y fue almacenado (*offline*) [[[Revisar todo este párrafo]]]

3.1. Electrones y fotones

Los electrones y fotones producidos en la colisión pp depositan la mayor parte de su energía en el calorímetro EM. Estos depósitos están restringidos a un número de celdas vecinas cuyo conjunto se denomina *cluster*, que tienen formas características de la producción de estas partículas. Como los depósitos de ambas partículas son similares, se utiliza además información del detector de trazas para poder distinguir una de otra. Al ser el fotón neutro no deja traza en el ID, por lo que los *clusters* que no están asociados a trazas son considerados fotones. Por otro lado, los *clusters* asociados a trazas del ID 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 correspon-

den 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* asociados 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. Es por eso se aplican 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*.

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, 3], que si bien tenían una respuesta lineal energética y un estabilidad frente a pile-up, no permitía reconstruir eficientemente la energía de fotones *bremsstrahlung* o de electrones/positrones producto de la creación de pares. La calibración de la energía descrita en [4] permite sacar ventaja de los *superclusters*, solucionando esto sin perder la linealidad y estabilidad de los *clusters* de tamaño fijo.

El algoritmo comienza buscando las celdas en el calorímetro EM con una señal mayor a un cierto nivel de ruido, y a partir de ellas agrupa las celdas vecinas que cumplan otros criterios más relajados de señal, formando lo que se denomina *topo-clusters* [?, 5]. Cabe mencionar que los *topo-clusters* pueden incluir celdas del calorímetro hadrónico para tener en cuenta los depósitos que se filtran.

Luego reconstruye las trazas utilizando un algoritmo de búsqueda de patrones de trazas estándar [?] en todo el ID. A su vez, utiliza los depósitos en el calorímetro EM que tengan una forma compatible con la de una lluvia electromagnética [[[definir mejor?]]] para definir regiones de interés. En estas regiones se utiliza otro algoritmo de búsqueda de trazas con criterios más relajados [?] para reconstruir trazas adicionales. Finalmente las trazas son ajustadas y asociadas a los *topo-clusters*. [[[entender mejor el tema de las trazas. calibraciones?]]]

Los vértices de conversión son reconstruidos a partir de pares trazas con 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.

A continuación el algoritmo construye los *superclusters* para electrones y fotones por separado. Para ello selecciona los *topo-clusters* con una energía mayor a cierto [[[Nota 1]]] umbral, y los agrupa con los demás *topo-clusters* satélites que estén contenidos dentro de una ventana angular fija centrada en el *topo-cluster* inicial. Dependiendo si el algoritmo es para fotones o electrones los umbrales son distintos, y en el caso de electrones o fotones convertidos, *topo-clusters* satélites adicionales son incluidos utilizando las trazas

asociadas. Como los *supercluster* de electrones y fotones son generados independientemente, puede ocurrir que un mismo *supercluster* produzca tanto un electrón como un fotón. En ese caso el candidato es guardado tanto como electrón y fotón simultáneamente, pero marcados como ambiguos y es decisión de cada análisis utilizarlos o no. Al finalizar esta etapa se obtienen los objetos finales que van a ser utilizados por los distintos análisis. [[[calibración? eficiencia?]]]

3.1.2. Identificación

Como se mencionó anteriormente, distintos criterios de identificación son utilizados para poder discriminar los objetos *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 calorímetro EM y de electrones producidos en el decaimiento de hadrones de sabor pesado. Esta identificación se basa en un método de likelihood que utiliza las variables descriptas en la Tabla [[[Tabla variables]]], y cuyas pdfs se obtienen de eventos con decaimientos de J/Ψ y Z para electrones de bajo y alto E_T respectivamente [6]. Para electrones se definen tres WP, *Loose*, *Medium* y *Tight*, cuyas eficiencias son 93 %, 88 % y 80 % respectivamente. [[[estas eficiencias son solo para EW?]]]

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 [[[Tabla variables]]]. Las variables que utilizan las primeras capas del calorímetro electromagnéticos son esenciales para discriminar los decaimientos del π^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 [[[figura pi vs fotón]]] 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. En la Tabla [[[Tabla variables fotones]]] se muestran las variables utilizadas por cada WP. Los WPs *Loose* y *Medium* [[[no me queda claro del paper que solo el medium sea online]]] 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 calorímetros, 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. [[[Resultados de la eficiencia + citas]]].

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 trazas.


La variable de aislamiento calorimétrico [7] (E_T^{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 ΔR [[[footnote definiendo esto]]] (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 [?]. Para electrones se utiliza un cono de radio $\Delta R = 0,2$ (E_T^{cone20}), mientras que para fotones se utiliza uno de $\Delta R = 0,2$ (E_T^{cone20}) o $\Delta R = 0,4$ (E_T^{cone40}) dependiendo del WP. La Figura [[[figura cono]]] muestra un esquema del cono utilizado para construir la variable E_T^{coneXX} .


La variable de aislamiento de trazas (p_T^{coneXX}) se define como la suma del momento transverso 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 [[[Nota 1]]]. 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 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^{cone20}).

[[[Poner en algún lado esto?: prompt electrons, isolated or produced in a busy environment, vs electrons from heavy-flavour decays or light hadrons misidentified as electrons]]]. 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 $E_T > 10$ 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^{cone} . Las definiciones de los distintos WPs de interés para esta tesis se listan en la Tabla [\[\[\[tabla con iso WPs\]\]\]](#).

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 [8]. La reconstrucción en el ID se realiza de la misma forma que con cualquier otra partícula cargada [?, ?]. La reconstrucción en el MS comienza con una búsqueda de patrones de *hits* [\[\[\[definir?\]\]\]](#) para definir segmentos en cada cámara de muones, que luego son combinados con un ajuste de χ^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. [\[\[\[algo más de descripción\]\]\]](#)
- 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 [[[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 [8] obtenidas a partir del estudio de simulaciones de producción de pares de *top-quarks*. 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^{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 de 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.

La reconstrucción de los jets comienza a partir de los depósitos de energía en el calorímetro hadrónico [[[el EM entra también? creo que sí]]] generando *topo-clusters* de la misma forma que para electrones y fotones [?][[realmente es la misma?]] Luego los *topo-clusters* son combinados mediante un algoritmo denominado 'anti- k ' que realiza los siguientes pasos:

- Calcula la distancia [[[aclarar que no es una distancia real?]]] 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 recombinados [[[explicar cómo]]], 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.

Los jets son objetos muy complejos de reconstruir y por ende requieren de una serie de calibraciones y correcciones [9]. Se realizan correcciones de pile-up para suprimir la contribución de otros vertices, y se calibra el momento del jet a partir de simulaciones de MC de eventos de dos jets.

[?]

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

3.4. Energía transversa faltante

[[[Probablemente ya haya mencionado antes MET y su importancia no? Por las dudas los explico nuevamente y de última lo saco]]]

Como se mencionó en [[[definición MET]]], el momento transverso faltante se utiliza como un sustituto [[[indicio?]]] 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 [[[o qu?]]] 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 momento transverso faltante como [10]:

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

En general no se utilizan las componentes de este vector sino que se utiliza su módulo (E_T^{miss}) y su ángulo (ϕ^{miss}), y cuando se menciona al momento transverso faltante se está haciendo referencia a su módulo. Otra variable que se utiliza además es ΣE_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^{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 [11, 12]. Si alguna de estas partículas comparte celdas con otra de una prioridad mayor, la misma se elimina del cálculo de E_T^{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 [10].

Los objetos que se incluyen en el cálculo de E_T^{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]]] [[[esta bien esto? MET depende de los objetos seleccionados?]]]. 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^{miss} . [[[resultados de eficiencia?]]]

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] ATLAS Collaboration. Electron and photon energy calibration with the ATLAS detector using 2015–2016 LHC proton–proton collision data. *JINST*, 14:P03017, 2019.
- [5] ATLAS Collaboration. Topological cell clustering in the ATLAS calorimeters and its performance in LHC Run 1. *Eur. Phys. J. C*, 77:490, 2017.
- [6] ATLAS Collaboration. Electron efficiency measurements with the ATLAS detector using 2012 LHC proton–proton collision data. *Eur. Phys. J. C*, 77:195, 2017.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] ATLAS Collaboration. Jet energy scale and resolution measured in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector. 2020.
- [10] 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.
- [11] 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.

- [12] 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.