Introducción

Los objetivos de este trabajo son por una parte el estudio y caracterización de los prototipos del calorímetro hadrónico del detector ATLAS en el acelerador SPS del CERN, durante los años 1997 - 1998, utilizando para ello distintos haces de partículas a diferentes energías y por otra la búsqueda del Bosón de Higgs basada en los datos procedentes de programas de simulación del detector ATLAS operando en el colisionador de protones LHC del CERN durante 3 años a baja luminosidad (10^{34} cm^{-2} s^{-1}) a una energía en centro de masas de E_{cm} = 14 TeV.

El colisionador LHC está diseñado para producir 23 colisiones protón-protón cada 25 ns. El detector ATLAS está en la fase de construcción, con un estricto esquema de trabajo para poder detectar las primeras colisiones en el LHC previstas para el verano del 2005. El detector ATLAS consta de diferentes subdetectores: El detector Interno, los Calorímetros electromagnéticos y hadrónicos y el Sistema de muones. Los calorímetros hadrónicos abarcan la región $|\eta|$ <4.9. En la región $|\eta|$ <1.7 nos encontramos con el calorímetro hadrónico de tejas (hierro-centelleador) formado por el barril y su extensión y con la zona "muerta" (ITC) situada entre ambos calorímetros y donde se ubican los cables y la electrónica de dichos detectores. En la región 1.5< $|\eta|$ <4.9 se sitúan los calorímetros de Argón Líquido, donde los tapones (HEC) se extienden hasta $|\eta|$ <3.2 y los calorímetros hacia adelante (FCAL) en el intervalo 3.1< $|\eta|$ <4.9.

El calorímetro hadrónico de tejas (Tile - Cal) es un calorímetro de muestreo que utiliza hierro como absorbente y placas centelleadoreas como medio activo. La construcción de los módulos se lleva a cabo por apilamiento repetitivo de placas de hierro siguiendo un período de cuatro densidades. El calorímetro es un barril de radio interno 2.28 m y de radio externo 4.32 m. Se subdivide en un barril central de 5.64 m y dos extensiones colaterales de 2.65 m cada una. Cada uno de los barriles consta de 64 módulos (sectores) en la dirección azimutal (ϕ). La innovación principal de esta tecnología es la orientación de las tejas centelleadoras que se colocan perpendicularmente a los haces de partículas en colisión. Esta orientación avalada por las simulaciones de Monte Carlo permite una construcción mecánica muy simple, así como una lectura fácil de las tejas y suministra una buena homogeneidad de los datos cuando se coloque un calorímetro electromagnético delante del hadrónico con el fin de tener dos longitudes de interacción de los materiales activos.

Dentro del marco de la colaboración RD34, el equipo de Valencia trabaja sobre el concepto y el perfeccionamiento del calorímetro hadrónico de tejas centelleadoras. Los primeros test comenzaron en 1993 con tres módulos de 1 m de longitud y 1.80 m de profundidad. En 1994 y 1995 el prototipo pasó de 3 a 5 módulos de las mismas dimensiones que en 1993. En 1994 y 1996 se efectuaron una serie de tets combinados entre un prototipo del calorímetro electromagnético de argón líquido y los 5 módulos. En septiembre de 1996 se llevó a cabo un test de un prototipo a tamaño real de la parte del barril del calorímetro, denominado módulo 0. En octubre de 1997 se realizó un test sobre dos prototipos de los tapones del barril "extended barrel module 0". Este test consisitió en analizar conjuntamente dichos prototipos de los tapones con los 5 módulos anteriormente mencionados. En Julio de 1998 se volvió a hacer un test sobre el "módulo 0" junto con los 5 módulos de 1 m de longitud. Uno de los principales objetivos de estos test con haces de partículas es la optimización del diseño para cumplir los requisitos físicos y mecánicos impuestos a la calorimetría hadrónica en el LHC, como por ejemplo:

- identificar los *jets* y medir sus energías y su dirección,
- medir la energía transversal total perdida (E_T^{miss}),
- mejorar la capacidad de identificar las partículas.

Con el fin de poder alcanzar los objetivos físicos marcados, el calorímetro requiere una resolución en energía de $\frac{\sigma}{E} = \frac{50\%}{\sqrt{E}} \oplus 3\%$ y una segmentación de $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$.

El Modelo Estándar de la Física de Partículas Elementales (SM) describe con un alto grado de precisión la materia y sus interacciones a las energías alcanzadas por los aceleradores actuales. Sin embargo, algunas cuestiones continúan todavía sin ser resueltas y existe la convicción entre los expertos de que este modelo no puede considerarse la teoría final. Una de las extensiones más prometedoras del Modelo Estándar es la Supersimetría (SUSY). Ésta asume la existencia de una simetría entre fermiones y bosones que da lugar a la predicción de nuevas partículas supersimétricas, compañeras de todas las partículas conocidas.

El modelo supersimétrico predice dos dobletes de Higgs y cinco estados físicos del bosón de Higgs, a diferencia del SM que predice únicamente un doblete y un estado físico. Los estados físicos predichos son: dos cargados ($H^{\pm}$) y tres neutros (h, H, A). Los bosones h y H son escalares y el A es pseudoescalar. Uno de los principales objetivos de investigación a estos niveles de energía (14 TeV) es la búsqueda de nuevas partículas, en especial el bosón de Higgs y las partículas supersimétricas.

La búsqueda de los cinco estados físicos del bosón de Higgs se realiza dentro del marco del Modelo Estándar Supersimétrico Mínimo (MSSM). Las masas y acoplamientos de estos estados pueden ser expresados en términos de dos parámetros, como pueden ser:

m_A, la masa del bosón de Higgs pseudoescalar y tanβ, el valor esperado en el vacío del cociente entre los dos dobletes de Higgs. Además, se supone que las partículas supersimétricas no juegan un papel importante en la fenomenología de las desintegraciones del Higgs en el MSSM, debido a que se consideran suficientemente pesadas. Dada su capacidad previsible de descubrimiento, el interés se centra en varios canales de desintegración del bosón de Higgs, también accesibles en el caso del SM, como son: h $\rightarrow$ b$\bar{\text{b}}$, H $\rightarrow$ ZZ $\rightarrow$ 4l, otros canales muy favorecidos a valores grandes de tanβ son: H/A $\rightarrow \tau$ τ, H/A $\rightarrow \mu$ μ y con valores pequeños de tanβ: H/A $\rightarrow$ t$\bar{\text{t}}$, A $\rightarrow$ Zh, H $\rightarrow$ hh.

En colisones protón-protón el descubriento del bosón de Higgs por el experimento ATLAS, dentro de las regiones del espacio de parámetros: m_A = 50 - 500 GeV y tanβ = 1-50, debería estar garantizado. Además más de un bosón de Higgs y/o más de un modo de desintegración será accesible en dichas regiones.

Este trabajo está estructurado en cinco capítulos. En el primero se introduce el concepto de Supersimetría y se mencionan las cuestiones no resueltas por el Modelo Estándar y que sugieren la búsqueda de teorías más generales más alla de este modelo. Seguidamente, se discuten las motivaciones para la Supersimetría y se presentan los conceptos básicos del Modelo Estándar Supersimétrico Mínimo. También se explican los mecanismos de ruptura de la Supersimetría y sus consecuencias fenomenológicas más importantes.

En el segundo capítulo se describe el dispositivo experimental. Se comienza con una introducción al acelerador LHC y su funcionamiento, seguida de la descripción del detector ATLAS. Las principales características de los subdetectores son también tratadas en este capítulo.

El tercero se centra en la descripción de las principales características de la cascada electromagnética y hadrónica, así como en sus diferencias. A continuación, se discuten los efectos del cociente e/h sobre la construcción de un calorímetro y como afecta a la resolución energética del mismo. Finalmente, se describre el calorímetro hadrónico de tejas del detector ATLAS. Al final del capítulo se resumen todos los requisitos físicos y mecánicos del calorímetro hadrónico para conseguir los objetivos físicos marcados en el ambicioso programa del LHC.

En el capítulo cuatro se describen los test llevados a cabo con haces de partículas sobre prototipos de la parte del barril y de la extensión del barril del calorímetro hadrónico de tejas centelleadoras. En Octubre de 1997 se efectuó un test sobre dos extensiones ("extended barrel modules 0"), una fabricada en Barcelona (España) y la otra en Argonne (USA). Los módulos fueron analizados junto con los cinco módulos antiguos de 1 m de longitud, de tal forma que ambos "extended barrel modules 0" fueron situados en medio de los 5 módulos anteriormente mencionados disminuyendo de esta forma la pérdida de cascada transversal. En Julio de 1998 se realizó un test utilizando un prototipo del barril ("barrel module 0"). El módulo fué estudiado junto a los cinco módulos de 1 m de longitud como en el test de 1997.

El análisis realizado en este trabajo tiene como objetivo calcular la resolución energética hadrónica, la linealidad y el factor e/h del calorímetro de tejas, para comprobar que están dentro de los requisitos exigidos para el calorímetro hadrónico de ATLAS. Para realizar este estudio se han utilizado haces de test de piones con energías entre 20 y 400 GeV para valores de η desde -1.4 hasta -0.25. También se describen los cortes utilizados para la elección de los sucesos a ser analizados. Además, se mencionan los métodos utilizados para la reconstrucón de la energía de los piones ("Raw Data", "Benchmark", y "H1"), estudiándose la evolución de la linealidad y de la resolución energética hadrónica a través de dichos métodos. Después, se proporcionan detalles acerca de la simulación y generación Monte Carlo de sucesos del prototipo del barril ("Barrel Module 0"), usando los mismos métodos para la reconstrución de la energía y el estudio de la linealidad y la resolución. Se comprueba que la linealidad y la resolución de los prototipos del calorímetro de tejas mejoran utilizando el método "H1". Además, los resultados son compatibles entre los diferentes módulos y valores de η. El método de "Benchmark" proporciona resultados idénticos respecto a la linealidad que los "Raw data", mejorandola un poco a altas energías. A continuación se muestra un análisis para extraer el valor e/h, que es el cociente entre la respuesta electromagnética y la no electromagnética (puramente hadrónica) de la cascada hadrónica en el calorímetro. Valores de e/h diferentes a 1 causan desviaciones en la linealidad de la respuesta hadrónica, empeorando la resolución energética e introduciendo colas en las distribuciones energéticas. En el caso del calorímetro de tejas se espera que el valor del factor e/h sea mayor que uno, debido a la orientación perpendicular de las tejas repecto al haz incidente. Por último se hace un estudio comparativo entre los prototipos del barril y de las extensiones, poniendo de manifiesto que ambos prototipos cumplen con los requisitos exigidos a nivel de resolución, linealidad y e/h por la colaboración ATLAS.

En el capítulo cinco se describe la búsqueda del bosón de Higgs desintegrándose a quarks top dentro del marco del Modelo Estándar Supersimétrico Mínimo (MSSM), suponiendo que las partículas supersímetricas son muy pesadas, de tal forma que no juegan un papel importante en las desintegraciones del bosón de Higgs. Debido al fuerte acoplamiento del bosón de Higgs a bosones "gauge", la probabilidad de desintegración del $\mathrm{H} \rightarrow \mathrm{t\bar{t}}$ es muy pequeña, del orden del 10%. Sin embargo, en el caso del MSSM la probabilidad de desintegración del $\mathrm{H} \rightarrow \mathrm{t\bar{t}}$ y $\mathrm{A} \rightarrow \mathrm{t\bar{t}}$ es muy próxima al 100% para masas del bosón de Higgs mayores que dos veces la masa del top y para valores de $\tan\beta$ próximos a 1. Las desintegraciones $\mathrm{H} \rightarrow \mathrm{t\bar{t}}$ y $\mathrm{A} \rightarrow \mathrm{t\bar{t}}$ no se pueden distinguir experimentalmente, debido a que ambos bosones están degenerados en masa en la región relevante del espacio de parámetros. En un segundo paso se proporcionan detalles acerca de la simulación del detector ATLAS y la generación de los sucesos usando dos programas Monte Carlo. El primero se denomina ATLFAST, el cual es un programa de simulación intermedio entre un análisis simple, a nivel de partones, y una sofisticada simulación completa del detector. Este programa se utiliza para una rápida generación de sucesos de la señal y del fondo incluyendo los aspectos más relevantes del detector: reconstrución de "jets" en los calorímetros, reconstrución del momento y de la energía de los leptones y fotones, efectos de los campos magnéticos y evaluación de la energía perdida transversa. El segundo programa usado se denomina SLUG-DICE-ATRECON, el cual proporciona una simulación sofisticada del detector y por lo tanto la generación de suecesos no es tan rápida como en el caso de ATLFAST. Una simulación completa (full simulation) del detector es siempre necesesaria para el estudio de los efectos del ruido, calibración e intercalibración de calorímetros, detallado desarrollo de la cascada, "pile-up", "cracks" y además proporciona una parametrización para la simulación rápida (fast simulation).

La estrategia utlizada para la identificación de sucesos procedentes de las desintegraciones del H/A a quarks top se basa en la identificación de estados finales de la forma $\mathrm{WWb\bar{b}}$. Uno de los top se desintegra: $t \to Wb$, seguido de una desintegración semileptónica del bosón W, $\mathrm{W} \to \mathrm{l}\nu$, dando un lepton aislado utilizado para el "trigger". El segundo bosón W se desintegra hadrónicamente, $\mathrm{W} \to \mathrm{jj}$. Por lo tanto, esta situación nos proporciona una topología con un leptón aislado y cuatro "jets" en el estado final. En primer lugar se explican los cortes cinemáticos aplicados sobre los sucesos con el objetivo de rechazar el fondo reducible (W + "jets") con $\mathrm{W} \to \mathrm{l}\nu$ y disminuir el fondo irreducible ($\mathrm{t\bar{t}} \to \mathrm{bl}\nu\mathrm{bjj}$). Después, se estudian diferentes algoritmos para la reconstrución de la masa invariante $\mathrm{t\bar{t}}$, obteniendo la resolución de la señal, la relación señal/ruido y la significancia estadística para masas del Higgs entre 370 y 450 GeV. Además, se reproduce la forma y la magnitud del fondo combinatorial para el canal hadrónico ($\mathrm{t} \to \mathrm{bjj}$) y para el semileptónico ($\mathrm{t} \to \mathrm{bl}\nu$). A continuación se hace un estudio con intención de extraer la señal respecto al fondo, para el intervalo de masas mencionado anteriormente, teniendo en cuenta los errores sistemáticos procedentes de la normalización y de la forma del fondo. Se comprueba que la extracción de la señal puede llegar a ser posible para masas del Higgs diferentes a 400 GeV, debido a que el fondo irreducible forma un pico alrededor de esta masa. Para masas próximas a 400 GeV únicamente un exceso de sucesos sobre el fondo irreducible nos llevaría a la observabilidad de la señal y además sería necesario que se vencieran las incertidudes teóricas sobre la forma del fondo. Finalmente, se lleva a cabo una comparación entre los dos programas de simulación es, encontrándose un buen acuerdo entre las aceptancias de selección de los cortes cinemáticos y las resoluciones en masa del top y del Higgs. Al final del capítulo se resume el potencial del detector ATLAS para el descubrimiento del bosón de Higgs dentro del marco del Modelo Estándar o del Modelo Estándar Supersimétrio Mínimo, haciendo un repaso de todas las opciones de desintegración del Higgs.

Para finalizar, se dedican las últimas páginas a recoger las conclusiones más importantes derivadas de este trabajo.