

# Test, software, calibración... la cuenta atrás de ATLAS

C. IGLESIAS, B. SALVACHÚA  
GRUPO TILECAL- Dpto. Física Atómica y Molecular

Instituto de Física Corpuscular, IFIC (Valencia)  
Centro mixto CSIC – Universidad de Valencia

## 1. INTRODUCCIÓN

¿Por qué tienen masa algunas partículas? ¿Cuál es el origen del universo? ¿Por qué no hay la misma cantidad de materia que de antimateria? Para solucionar algunas de estas preguntas está siendo construido el LHC (*Large Hadron Collider*). Este colisionador de protones a energías en centro de masas de 14 TeV y luminosidad de  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  es actualmente el proyecto más importante y ambicioso en la física de partículas.

Para el LHC se han diseñado cuatro grandes experimentos, ATLAS [1] es uno de ellos. El detector mide 44m de ancho, 22m de alto y pesa más de 7000 toneladas (Ilustración 1). ATLAS, al igual que los otros tres experimentos, es un reto para la comunidad científica. Este detector heterogéneo está compuesto por varios subdetectores, cada uno con unas propiedades específicas según la funcionalidad para la que fueron diseñados.

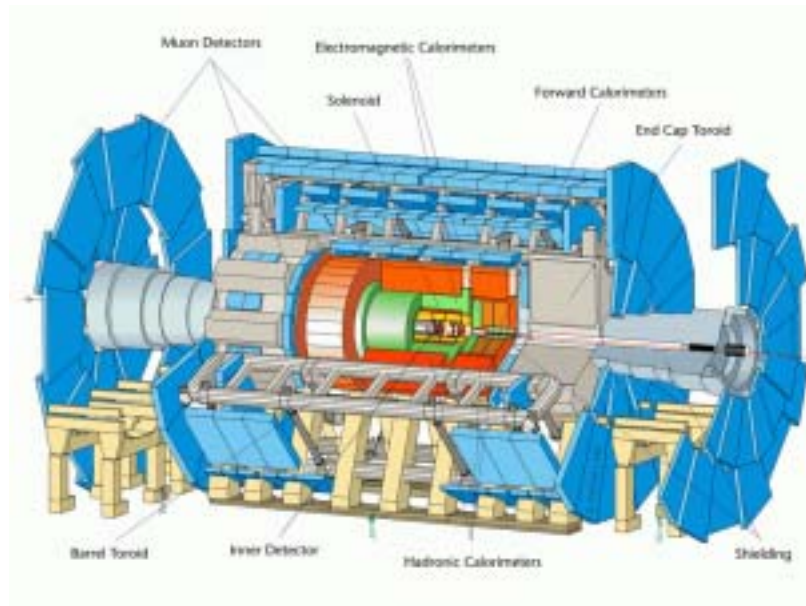


Ilustración 1: Composición de ATLAS

Desde el interior hacia el exterior ATLAS se compone de:

- Detector interno de trazas.
- Imanes solenoidales.
- Calorímetros, hadrónico y electro magnético.
- Imanes toroidales.

- Cámaras de muones.

Pero el objetivo de esta nota no es describir cada uno de los subdetectores sino los procesos previos a la puesta en marcha de ATLAS. Sin embargo, ATLAS es extremadamente complejo, cada subdetector está compuesto de diferentes partes y cada parte está a su vez dividida en más partes, así que para simplificar esta complejidad, aquí, sólo se describirán algunas de las pruebas y calibraciones anteriores a la construcción de ATLAS. En particular nos centraremos en uno de los subdetectores, TileCal.

## **2. EL CALORÍMETRO HADRÓNICO DE TEJAS, TILECAL**

Los detectores calorimétricos están diseñados para absorber la energía de las partículas que los atraviesan. TileCal [2], es el calorímetro hadrónico de tejas de ATLAS. Está compuesto por tres barriles, uno central de 5,6m y dos extensiones de 2,9m cada una. El radio interno es de 2,2m y el externo de 4,2m.

TileCal es uno de los subdetectores más sencillos dentro de ATLAS aunque no por ello menos importante. Cada barril está dividido azimutalmente en 64 módulos (Ilustración 2). Cada módulo es una estructura de tejas de hierro (material pasivo) alternadas con tejas de plástico centellador (material activo), de forma que las tejas están en un plano perpendicular al eje del haz, lo que da homogeneidad a la señal recogida.

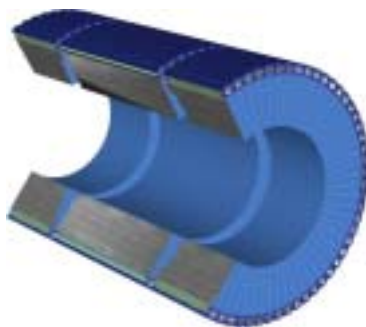


Ilustración 2: Calorímetro hadrónico de Tejas de ATLAS, TileCal

### **2.1 Funcionamiento de TileCal**

Los materiales centelladores emiten luz en forma de pequeños pulsos cuando son atravesados por partículas o radiación [3], si acoplamos el centellador a un fotomultiplicador el pulso de luz se convierte en un pulso eléctrico que puede ser analizado.

En el caso de los centelladores de TileCal, cuando una partícula atraviesa una teja centelladora emite luz en el rango del UV (ultravioleta) cuya intensidad es proporcional a la energía depositada por la partícula. Esta luz es recogida por fibras ópticas WLS (*wavelength shifting*) que están acopladas a las tejas de forma radial (Ilustración 3). Las fibras absorben la luz emitida, la cambian de longitud de onda y la guían a un fotomultiplicador que transformará esta luz en un pulso eléctrico que será

tratado por la electrónica. Cada teja es leída por dos fotomultiplicadores para conseguir redundancia en la señal. A un mismo fotomultiplicador le llega señal de varias fibras, es así como se definen las celdas de lectura. Solo TileCal tiene unos 10.000 fotomultiplicadores y todos han seguido un exhaustivo control de calidad.

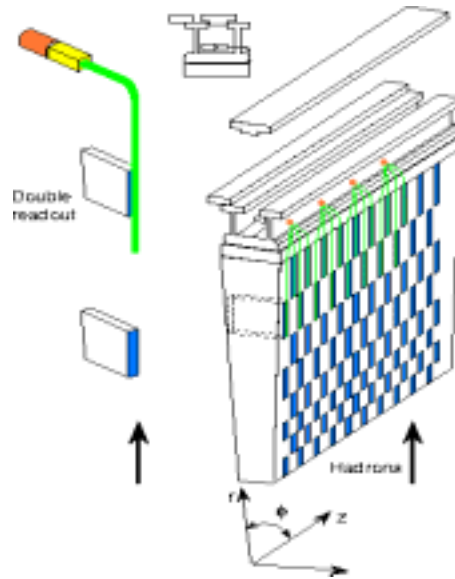


Ilustración 3: Esquema de un módulo de TileCal

## 2.2 CONTROL DE CALIDAD DE TEJAS Y FIBRAS

Antes de montar y utilizar un módulo de TileCal debemos asegurarnos de que los componentes están en perfecto estado. Durante la instrumentación de los módulos se realizan diferentes controles de calidad:

- Preparación del módulo.
- Inspección de las tejas.
- Verificación de la longitud de las fibras y su clasificación.
- Verificación del recorrido de las fibras con una fuente de luz.
- Comprobación del estado de las fibras.
- Inspección del final de las fibras.
- Control de calidad óptico y certificación.

Nos vamos a centrar en este último ya que es de los más completos. Este control de calidad está basado en el movimiento de un LED por un sistema hidráulico a través de todas las tejas del módulo [4]. El Instituto de Física de Altas Energías (IFAE) de Barcelona tiene importantes responsabilidades en este control de calidad.

El tipo de LED elegido es un NSPB-310A que emite luz con una longitud de onda  $\sim 470\text{nm}$  (luz azul). El LED se encuentra en el interior de un tubo metálico con una ventana de unos 3mm (Ilustración 4). Un sistema hidráulico es el responsable del movimiento del LED a través de todas las tejas (

Ilustración 5). El LED azul simula la luz UV generada por el centellador, esta luz es absorbida prácticamente en su totalidad por las fibras de modo que este sistema

no comprueba el centelleo de las tejas que es comprobado en otros institutos con fuentes radiactivas.



Ilustración 4: **LED y cápsula metálica en donde va insertado**



Ilustración 5: **Sistema hidráulico responsable del movimiento del LED**

Con este método es posible discernir entre fallos en el tintado de las tejas, fallos en las fibras y fallos en el acoplamiento fibra-centellador estudiando y comparando las señales de una misma celda, de una misma fila y de un mismo fotomultiplicador.

### **2.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS FOTOMULTIPLICADORES**

En la configuración final del calorímetro de ATLAS serán utilizados unos 10.000 fotomultiplicadores, los cuales están siendo probados en 7 bancos de pruebas idénticos repartidos entre las diferentes instituciones colaboradoras, el Instituto de Física Corpuscular (IFIC) de Valencia es una de ellas y contribuye ya con 1.750 fotomultiplicadores.

Para la caracterización [6] de estos fotomultiplicadores se realizan medidas bajo luz pulsada y bajo luz continua, simulando la señal y el ruido de fondo en el LHC.

El banco de pruebas consiste en dos cajas, una que contiene las fuentes de luz, continua y pulsada, y otra que contiene los elementos ópticos (fotomultiplicadores). Como fuentes se utilizan dos LEDs azules de longitud de onda  $\sim 480\text{nm}$ . De la caja de los LEDs salen dos fibras líquidas (una para la luz continua y otra para la pulsada) que

repartirán la luz a dos conjuntos de 25 fibras ópticas las cuales irán a la caja de los fotomultiplicadores.

En este sistema se estudian propiedades tales como la linealidad, corriente oscura, eficiencia cuántica, eficiencia de colección... estas son propiedades que caracterizan a los PMT, en función de sus valores se decide si el fotomultiplicador está en buenas condiciones o si hay que devolverlo a fábrica.

## 2.4 SISTEMA DE CALIBRACIÓN DE TILECAL

A parte de los controles que aseguran que los componentes de los que está hecho nuestro detector están en condiciones óptimas, necesitamos conocer la respuesta de dichos componentes ante diversos estímulos para entender las señales obtenidas.

Calibrar es conocer la relación entre la energía depositada por las partículas al atravesar el detector y la señal digital que se obtiene después de atravesar toda la cadena electrónica.

TileCal consta de un completo sistema de calibración (Ilustración 6). Una parte es la calibración con una fuente de Cs137, otra es la calibración con la luz de un láser y otra con la inyección de carga directamente a la cadena electrónica.

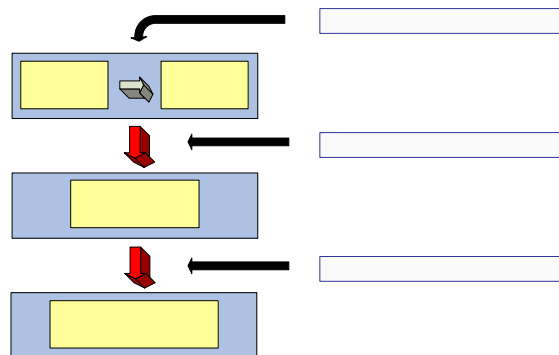


Ilustración 6: Sistema de calibración de TileCal

### 2.4.1 Calibración con Cs<sup>137</sup>

Una cápsula que contiene una fuente de Cs<sup>137</sup>,  $E_{\gamma} = 0.662\text{MeV}$ , se mueve a través de todas las tejas centelladoras por medio de un sistema hidráulico [2] (Ilustración 7). Esta fuente de, 5mCi, excita el material centellador de la misma forma que lo hacen las partículas del LHC [4]. La respuesta a esta fuente es el producto de la respuesta del calorímetro (tejas + fibras) y el fotomultiplicador. Este sistema nos permite:

- Estudiar la calidad y uniformidad de la respuesta del calorímetro.
- Intercalibrar las celdas de lectura ajustando la alta tensión de los PMTs.
- Controlar como varía la respuesta de las celdas en función del tiempo.

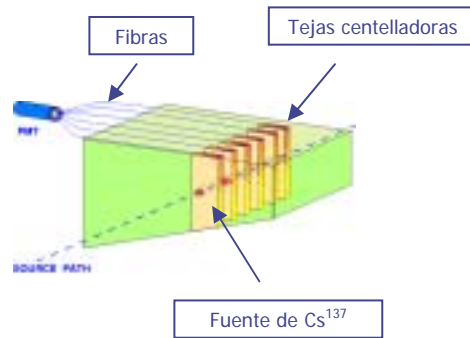


Ilustración 7: Calibración con Cs<sup>137</sup>

### 2.4.2 Calibración con láser

En una caja alejada del detector hay un láser que manda luz a través de fibras líquidas a un conector que distribuye la luz a cada fotomultiplicador, por seguridad dos fibras llegan a un mismo PMT (Ilustración 8). Estas dos fibras están pegadas y pulidas con el resto de fibras WLS de los centelladores. Los conectores a los que van unidas las fibras controlan y regulan la intensidad de la luz mandada.

Este sistema sirve para calibrar la ganancia del fotomultiplicador y su linealidad.

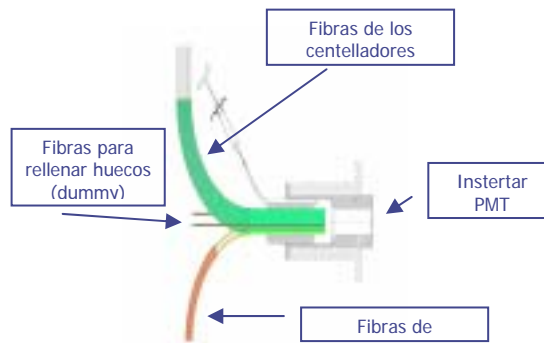


Ilustración 8: Calibración con láser

### 2.4.3 Calibración con inyección de carga

El sistema de lectura de TileCal está diseñado para medir deposiciones de energía en una celda desde  $\sim 30\text{MeV}$  hasta  $2\text{TeV}$ . Además la respuesta del calorímetro y la ganancia de la cadena electrónica deben ser calibradas y controladas con una precisión mejor del 1%.

La señal del fotomultiplicador atraviesa un circuito que modifica la forma del pulso eléctrico ensanchándola, después esta señal es dividida en dos, la primera va directamente a un conversor de señal analógica a digital (ADC, *Analogical to Digital Converter*) y la segunda pasa por un circuito amplificador antes de ser muestreada con el ADC.

Para la calibración con carga se genera un pulso por la descarga de un condensador, que puede ser de dos capacitancias conocidas y puede ser cargado con

diferentes tensiones de referencia, conociendo así el valor de la carga inyectada. Este pulso simula el pulso del PMT con la ventaja de que podemos calcular la relación entre carga inyectada y las cuentas de ADC de la digitalización.

### **3. Pruebas con partículas**

#### **3.1 PRUEBA CON HAZ DE TILECAL**

De las colisiones de los protones acelerados en el SPS (Super Proton Synchrotron) con blancos se obtienen haces secundarios de partículas que sirven a varios experimentos, en otros TileCal.

La comunidad de científicos de TileCal planea cada año un exhaustivo programa de calibración y prueba de la producción de módulos del calorímetro con los haces secundarios del SPS [2]. La finalidad es entender y evaluar posibles modificaciones de la electrónica interna, de lectura y de selección de datos, ya que tienen un importante impacto en ATLAS tanto a nivel económico como de interés científico.

La total intercalibración de los módulos se realizará con  $Cs^{137}$  y solo una fracción de los módulos producidos será calibrada con haces de partículas para corroborar los resultados de la calibración con cesio.



Ilustración 9: Configuración de las pruebas con haz de TileCal

Una mesa rotatoria fue diseñada y construida expresamente para soportar el peso de dos módulos del barril central y dos módulos de los barriles extendidos, en la Ilustración 9, se puede observar la configuración de los módulos. El primer módulo es el llamado módulo 0, que es un módulo con la configuración final pero anterior al periodo de producción. Sobre este se encuentra un módulo del barril central y sobre ambos dos barriles extendidos. Gracias a la mesa se pueden conseguir diferentes ángulos de incidencia. Las partículas que inciden en los módulos son electrones, piones y muones, a energías conocidas, esto nos permite evaluar la resolución del calorímetro, la constante de calibración de carga a energía y la relación entre la señal depositada por los electrones y los hadrones [7] (como los piones) ya que TileCal no es un calorímetro compensado.

#### **3.2 PRUEBA CON MUONES ATMOSFÉRICOS DE TILECAL**

El sistema más grande probado hasta ahora se constituía de 4 módulos (en las pruebas con haz), sin embargo, solo un barril contiene 64 módulos, así que se vio necesario un paso intermedio.

El experimento que se propuso fue utilizar los muones atmosféricos como partículas excitadoras, así no se dependería de la viabilidad del SPS y se podría continuar aún cuando TileCal estuviera instalado en el pozo, a 92m bajo tierra.

La configuración de los módulos elegida se puede ver en la Ilustración 10. Se instrumentarían 16 más 16 módulos y cuando un muón atravesara el detector dejaría señal en la parte superior y en la inferior, siendo la coincidencia de ambas partes la señal de *trigger* o disparo que indica que ha pasado una partícula.

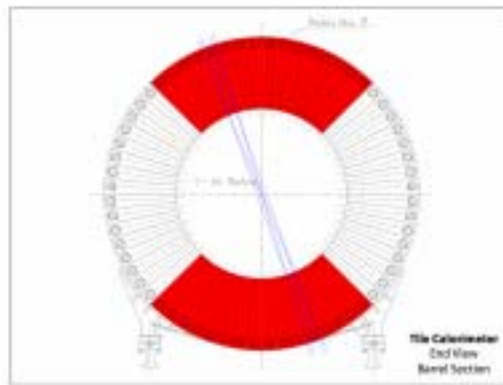


Ilustración 10: Configuración de TileCal para las pruebas con muones atmosféricos

### 3.3 PRUEBA CON HAZ VARIOS SUBDETECTORES

Después de aprender y entender por separado cómo funcionan los calorímetros, el detector interno, las cámaras de muones y el sistema de selección de datos individual a cada subdetector, llega el momento de juntarlo todo en una configuración común. La prioridad principal de utilización de los haces del SPS para el 2004 la tiene ATLAS para sus pruebas combinando varios subdetectores.

La principal motivación para estas pruebas fue la organización de un sistema de selección de datos común para todos los subdetectores, teniendo que integrar la diferente electrónica de lectura de cada componente. Pero no todo es *hardware*, en lo referente a *software* también hay que integrar los diferentes sistemas de adquisición, y poder a través de un mismo panel controlar y examinar la adquisición de todos los subdetectores.

La configuración de los detectores se puede ver en Ilustración 11, de izquierda a derecha se encuentran los detectores internos (pixel, SCT y TRT), calorímetro electromagnético de argón líquido dentro de un criostato para mantener la temperatura, luego módulos del calorímetro hadrónico de tejas y por último cámaras de muones. Los calorímetros se encuentran sobre la mesa rotatoria de TileCal, para conseguir diferentes incidencias del haz.

Las medidas que se esperan realizar son:

- Las clásicas de energía: resolución, linealidad y uniformidad en función del ángulo de incidencia y de la energía del haz.



- La relación entre la señal depositada por electrones y hadrones, en especial a bajas energías.
- Medidas calorimétricas con los detectores de trazas y el TRT, ya que son los que se utilizarán para medir bajas energías.
- Y elección del sistema de selección de datos buenos, *trigger*.

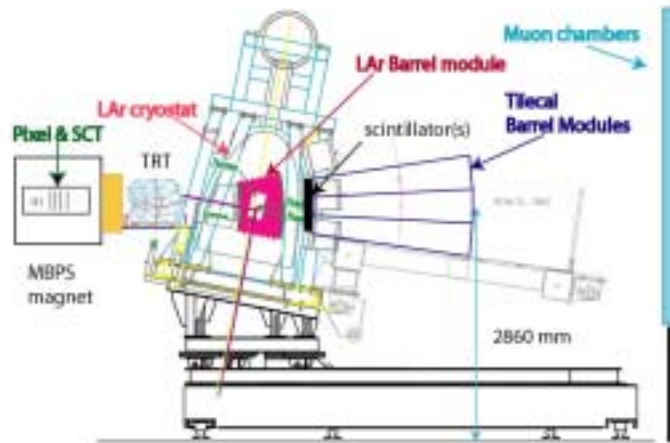


Ilustración 11: Configuración de los subdetectores de ATLAS en las pruebas con haz

#### 4. Software Online

Un sistema tan complejo hace necesaria la utilización de un *software* complejo. El Software Online de ATLAS esta siendo creado para configurar, controlar y observar el sistema de selección y adquisición de datos. Este *software* hace de medio comunicador entre diferentes detectores, entre el sistema de selección de datos, entre el flujo de datos y entre el sistema de control del detector. Lo único que no hace es el procesado y transporte de los datos de física.

El Software Online nos proporciona unos editores gráficos para configurar las bases datos, que serán:

- *Hardware*: ordenadores, tarjetas electrónicas...
- *Software*: librerías, aplicaciones...

Una vez tenemos las bases de datos configuradas, el software proporciona el control de las comunicaciones y un panel gráfico en el que se pueden integrar los diferentes subdetectores. Con este panel (Ilustración 12) se puede empezar la adquisición de datos, pararla temporalmente y definitivamente y supervisar el flujo de datos y si algunos procesos están funcionando correctamente, entre otras cosas.



Ilustración 12: Panel de control

## 5. Hardware: RoD

Una vez la señal de un fotomultiplicador ha atravesado lo que se llama la electrónica de “front-end” debe ser transferida al sistema de adquisición general, es aquí donde entran los RoD (Read Out Driver) (Ilustración 13).

El diseño de estas tarjetas es una labor complicada, la responsabilidad del diseño y funcionamiento de estas tarjetas para el calorímetro de tejas de ATLAS recae en el grupo TileCal del IFIC (Valencia).



Ilustración 13: Tarjeta ROD (Read Out Driver)

Los RoDs deben procesar alrededor de 10.000 canales cada  $10\mu s$  y en tiempo real [8]. Cada RoD tiene 4 unidades de procesamiento equipadas con los procesadores digitales (DSP) más potentes del mercado (Texas Instruments TMS320C6414@720MHz). También contiene la última tecnología en FPGAs (ALTERA APEX 20K en las unidades de procesamiento y ALTERA ACEX).

La entrada de estas tarjetas es óptica, los datos llegan por fibras, son convertidos a señal eléctrica, procesados y vueltos a mandar por fibra óptica al sistema de adquisición general.

Actualmente uno de los temas de más interés es el estudio de algoritmos de reconstrucción de la señal digital para implementarlos en los procesadores digitales (DSP) del RoD, ya que este procesado sería online y proporcionaría mucha información para el siguiente nivel de selección de datos. El grupo TileCal de Valencia también está altamente involucrado en esta actividad.

## 6. Instalación en el pozo

El pozo o caverna del área experimental debe acomodar al detector ATLAS y permitir un fácil acceso para su instalación y mantenimiento durante el periodo de funcionamiento del detector [1]. La caverna está situada en el punto 1 del túnel LEP/LHC (Ilustración 14).



Ilustración 14: Mapa del LHC

El pozo tiene el lugar justo para instalar ATLAS, dejando 2m de separación en cada lado y encima (con los andamios construidos), la anchura es de 26m, su longitud de 47m y su altura de 24,6m (Ilustración 15).

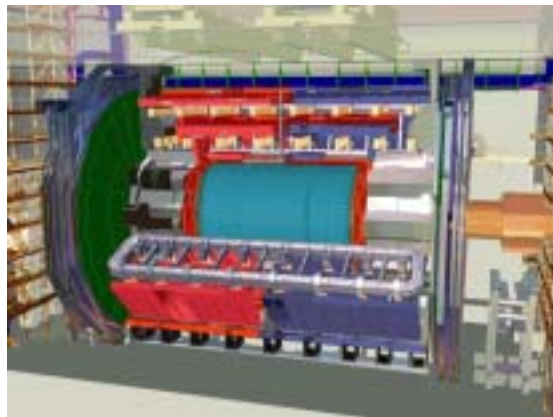


Ilustración 15: Simulación de ATLAS dentro del pozo

Lo primero es preparar el pozo (Ilustración 16), se instalarán los soportes de ATLAS y una estructura de raíles. Luego los imanes toroidales y los calorímetros, a los que les seguirán las cámaras de muones del barril central y los tapones (o las

extensiones de los barriles) de los calorímetros. El detector interno y las grandes ruedas de los muones serán los siguientes y se finalizará con los tapones de los imanes toroidales y las pequeñas ruedas de las cámaras de muones. Una vez terminada la instalación del detector se procederá a instalar el tubo de vacío y los elementos apantalladores.

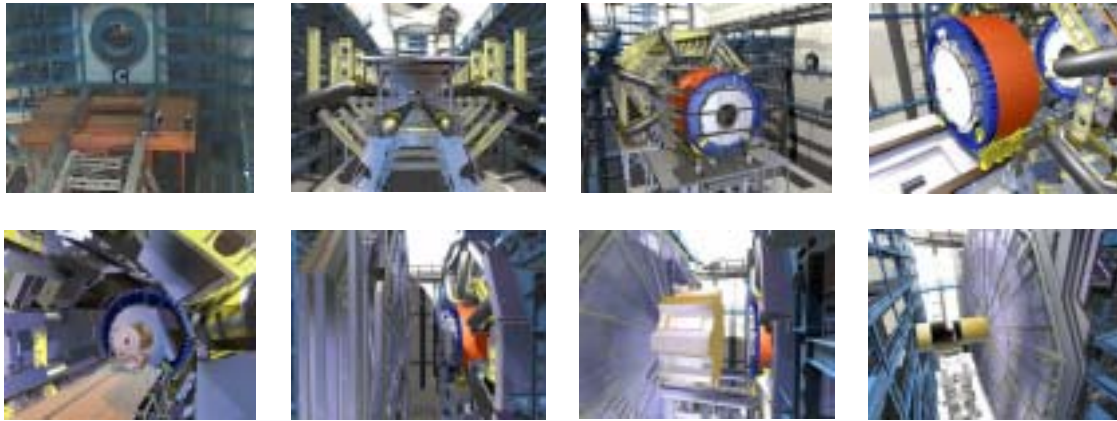


Ilustración 16: Pasos de la instalación de ATLAS

## 7. Referencias

1. ATLAS Technical Proposal, CERN/LHCC/94-43 LHCC/P2, 15-12-1994;
2. Tile Calorimeter Technical Design Report, CERN/LHCC 96-42, 15-12-1996;
3. Techniques for nuclear and particle experiments. Leo, William R.
4. "Quality Control of the optical response of the Extended Barrel modules of the ATLAS hadronic calorimeter.", Flix, J ATL-TILECAL-2000-016; : CERN, 26 Nov 2000 2000. - 120 p
5. Irene Vichou, Atlas Note, ATL-TILECAL-98-142; ATL-L-PN-142 , 27-01-1998;
6. Caracterización de 1500 fotomultiplicadores del calorímetro hadrónico de ATLAS. Salvachúa, B. et al, XXIX Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física, Vol. I Pág.361.
7. J.A. Budagov et al, ATL-TILECAL-01-1
8. <http://ific.uv.es/tical/rod/>