

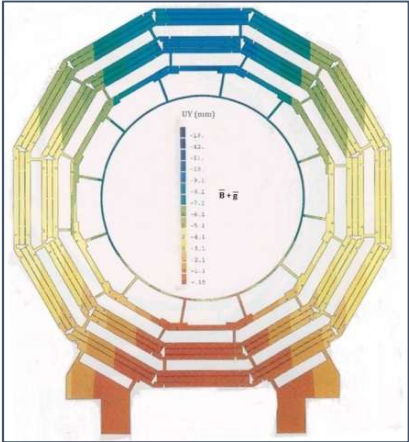
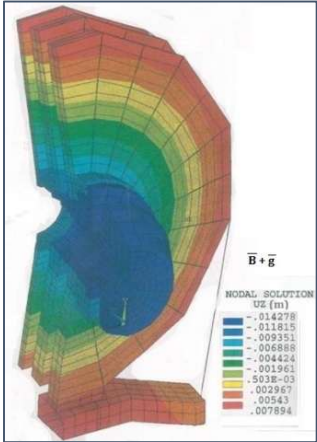
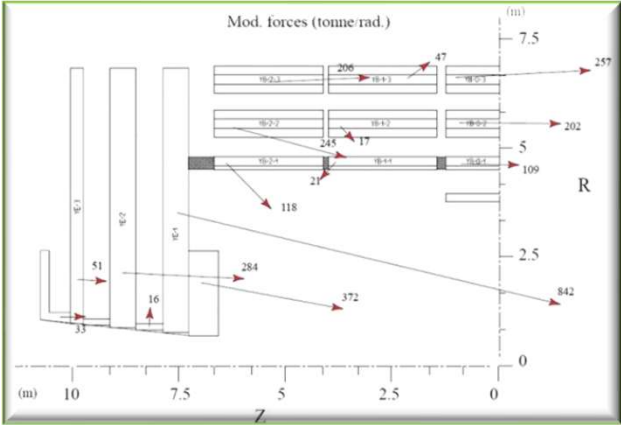
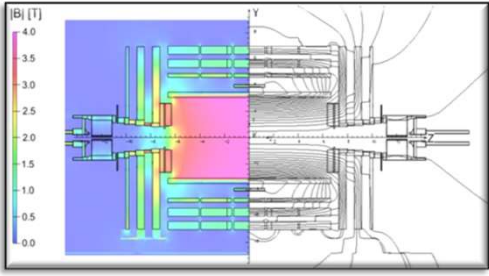
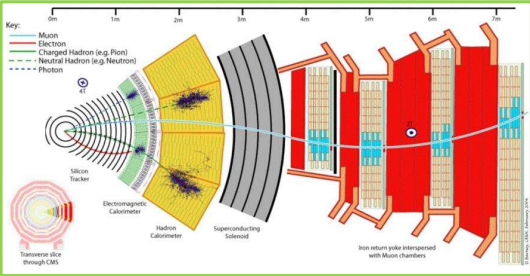
El Sistema de Alineamiento de CMS: Sub-Sistema de Alineación Global LINK.

Enrique Calvo et al.

Ciemat, 17 de septiembre de 2026.

1. El detector CMS
2. Sistema de Alineación de CMS
3. El sub- sistema de Alineación LINK
4. Calibración de componentes y Test de funcionamiento en condiciones de operación.
5. Instalación en CMS.
6. Resultados obtenidos por el LINK.
7. Personal del Ciemat que participó en el LINK.

Principal criterio de diseño :
Identificación y medida del momento de muones con gran eficiencia y precisión.



CMS Detector

Pixels
Tracker
ECAL
HCAL
Solenoid
Steel Yoke
Muons

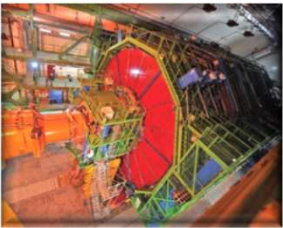
SILICON TRACKER
Pixels (Resolution 15 μm)
~1m² ~68M channels
Microstrips (Resolution 23-53 μm (X,Y)
230-530 μm (Z))
~200m² ~9.6M channels

CRYSTAL ELECTROMAGNETIC CALORIMETER (ECAL)
~76k scintillating PbWO₄ crystals
(Photon, electron)

PRESHOWER
Silicon strips
~16m² ~137k channels

FORWARD CALORIMETER
Steel + quartz fibres
~2k channels

STEEL RETURN YOKE
~13000 tonnes

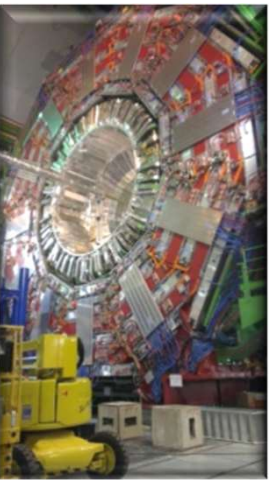
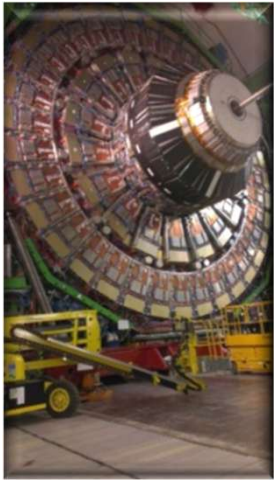


SUPERCONDUCTING SOLENOID
Niobium-titanium coil
carrying ~18000 A

HADRON CALORIMETER (HCAL)
Brass + plastic scintillator
~7k channels
(Hadron, jets)

MUON CHAMBERS
Barrel: 250 Drift Tube & 480 Resistive Plate Chambers
Endcaps: 468 Cathode Strip & 432 Resistive Plate Chambers
(Resolution 100 μm)

Total weight : 14000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T



Hasta 3.8 T (TRACKER de CMS).

Deformaciones máximas en CMS: ~30 mm.

10⁵ Gy y 2×10¹⁴ neut./cm² (TRACKER de CMS).

La combinación de fuerzas inducidas (T^a , $\vec{g}$, $\vec{B}$) sobre la estructura CMS (sub-detectores):

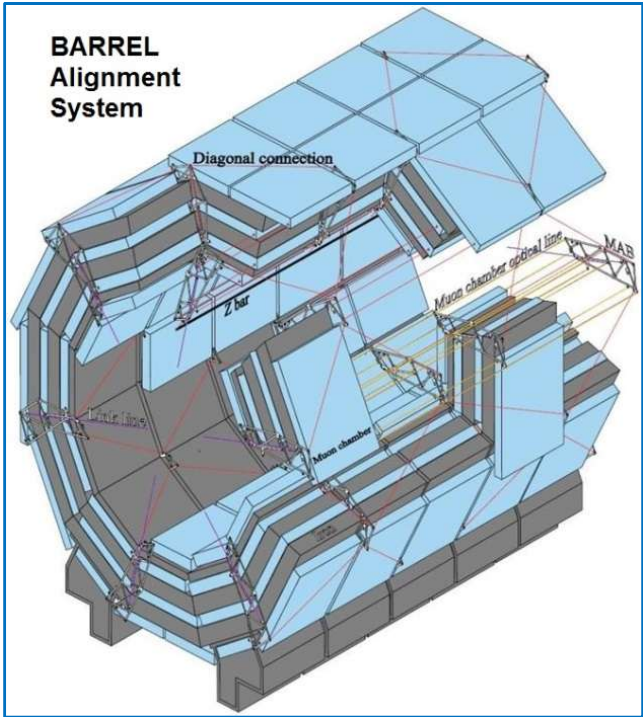
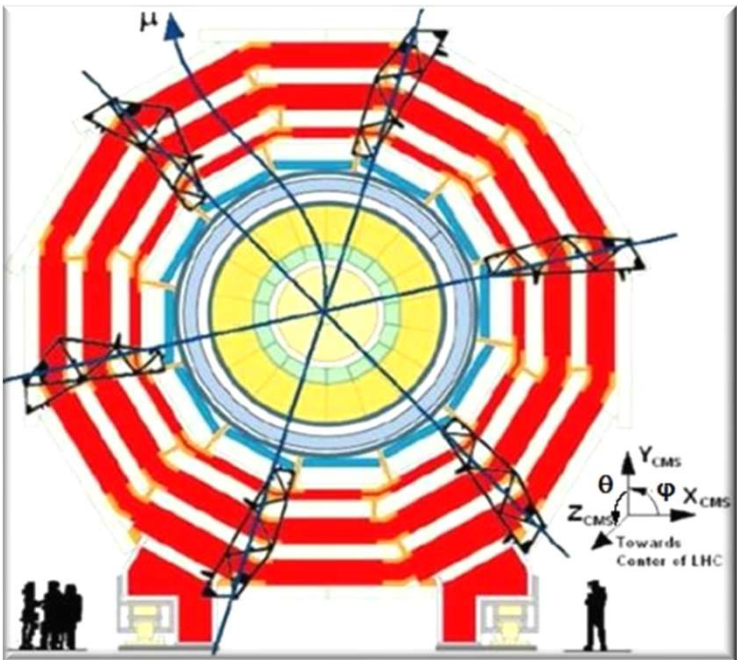
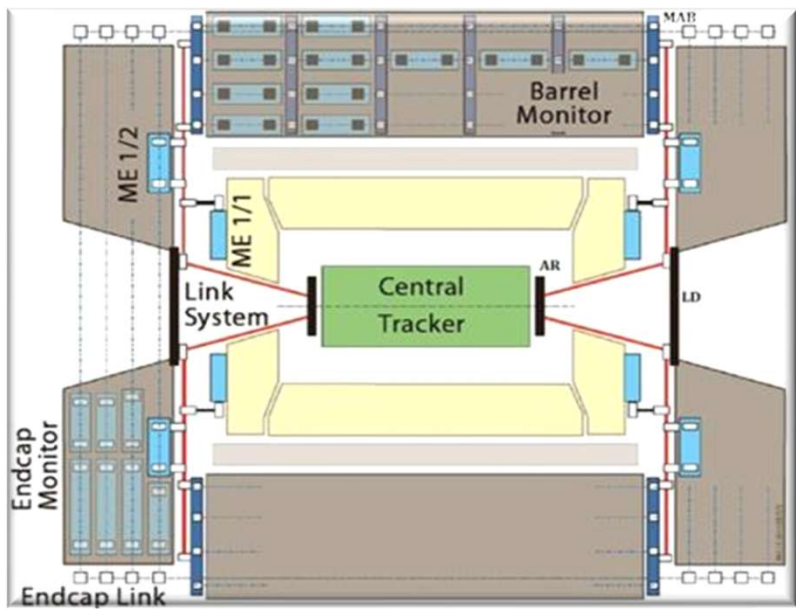
- desplazamientos de los componentes de sus posiciones nominales.
- Inestabilidad en los subdetectores, para la precisión espacial requerida.

Necesario un **sistema de alineación** que monitorice de forma continua las posiciones relativas entre estos sub-detectores con la precisión necesaria para realizar la reconstrucción de las partículas y rango de varios centímetros, que sus componentes sean capaces de funcionar a ese $\vec{B}$ y nivel de irradiación a que están sometidos. Y poder compensar cambios de temperatura de varios grados.

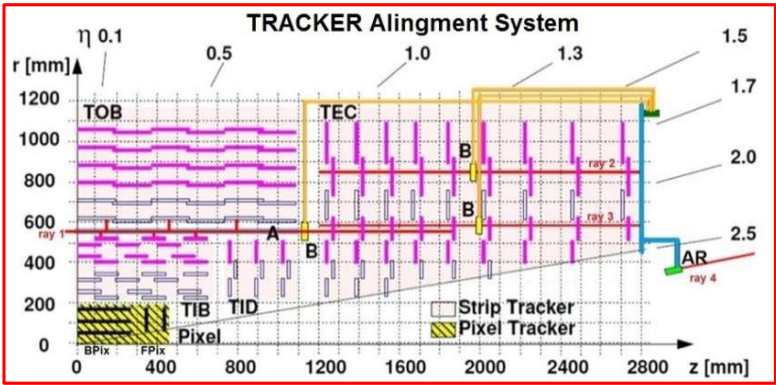
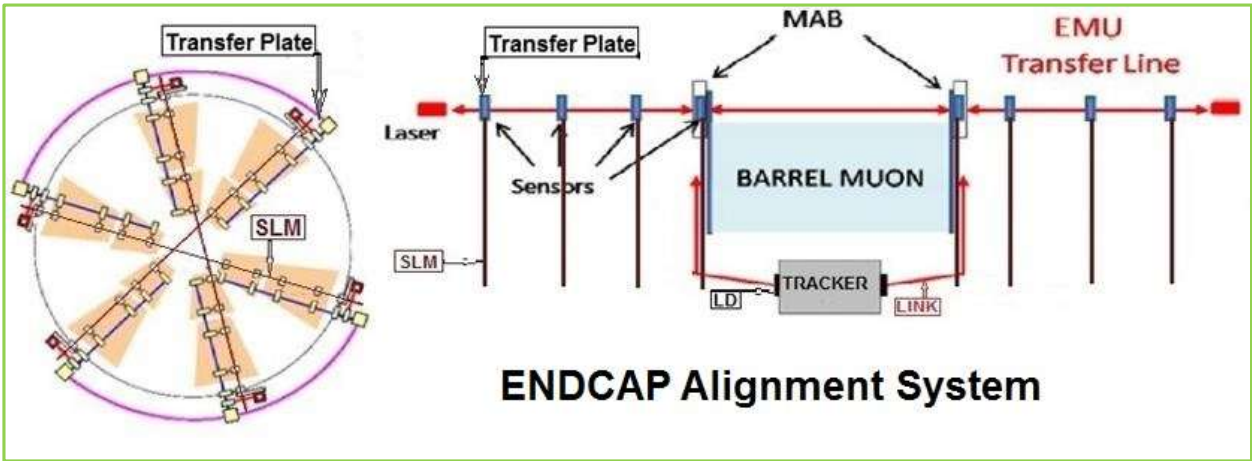
1. El detector CMS
2. Sistema de Alineación de CMS
3. El sub- sistema de Alineación LINK
4. Calibración de componentes y Test de funcionamiento en condiciones de operación.
5. Instalación en CMS.
6. Resultados obtenidos por el LINK.
7. Personal del Ciemat que participó en el LINK.

Sistema de alineación de CMS. Control de movimiento en CMS: **sistema de alineación** opto-mecánico de detección.

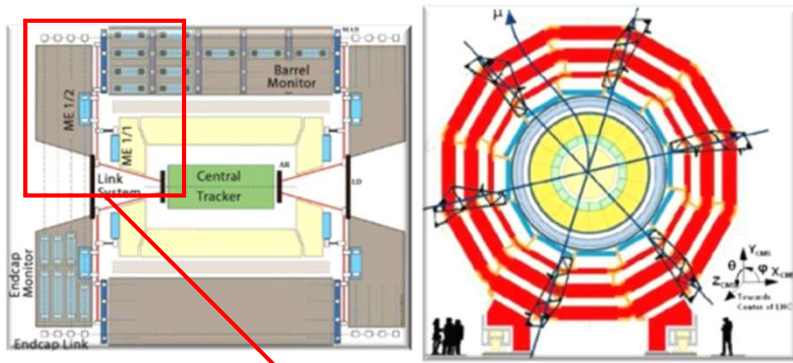
- detectores electrónicos.
- medición continua de la posición de las cámaras de muones respecto al detector central de trazas.
- correcciones a-posteriori durante la reconstrucción de las trazas que se hace off-line.



Sistema de Alineación LINK de CMS: nexo de unión entre los sub-sistemas TRACKER, BARREL y ENDCAP.

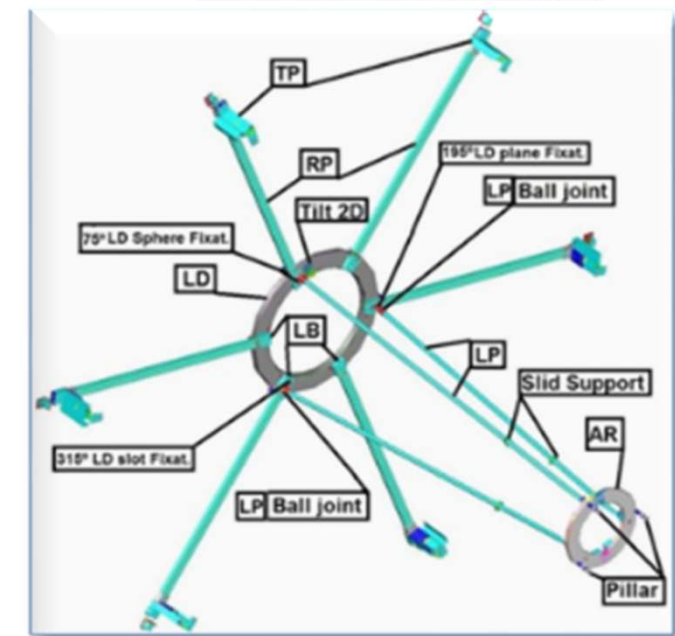
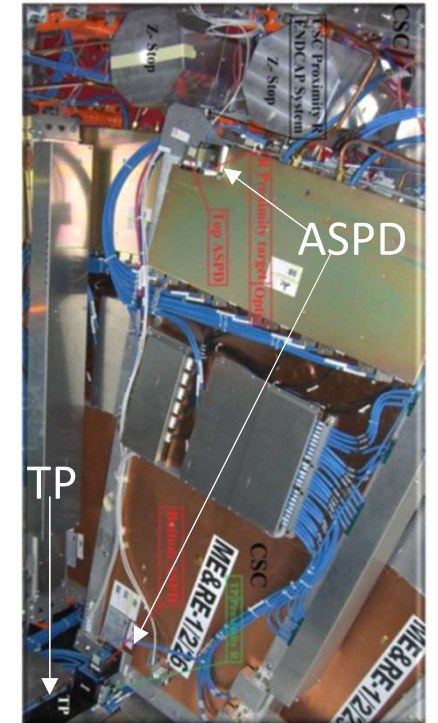
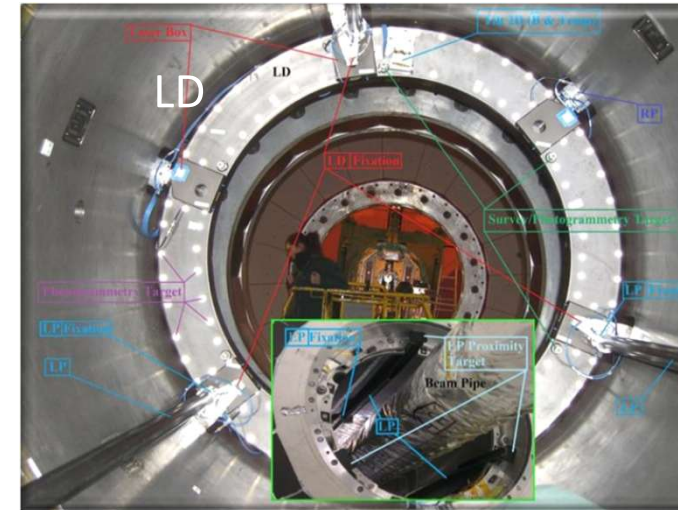
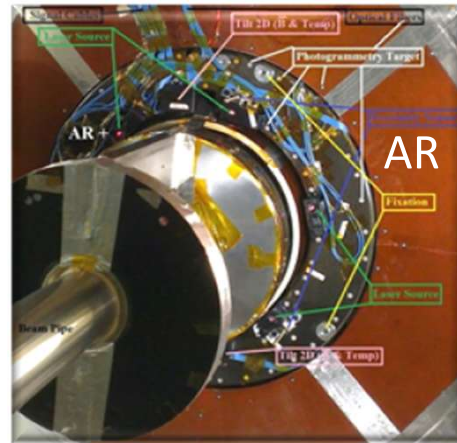
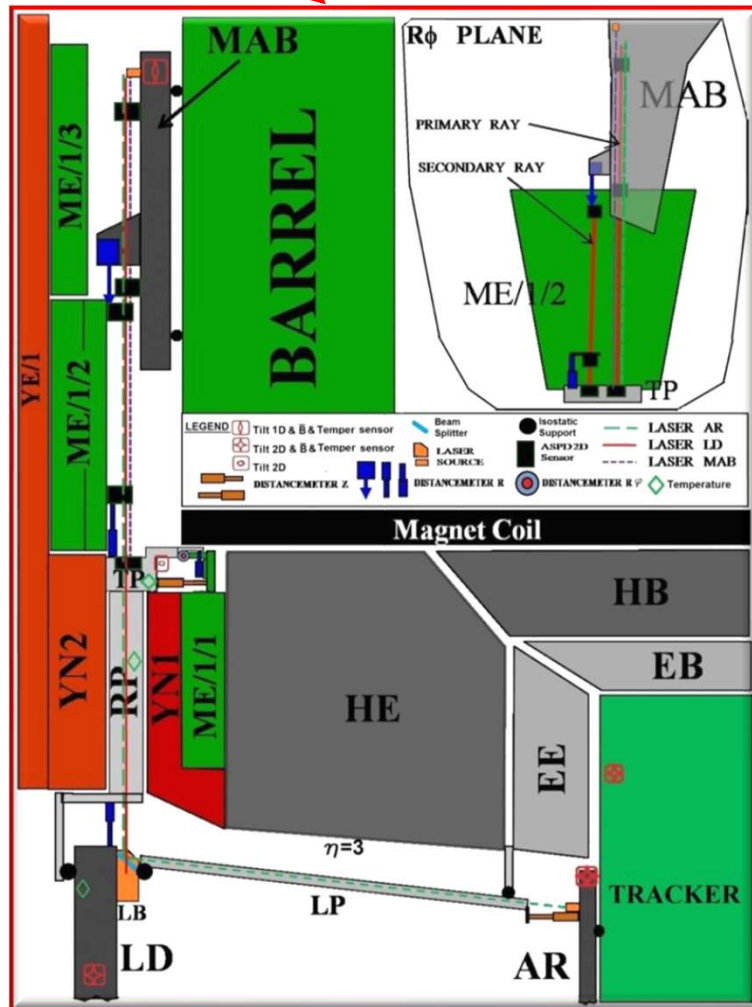


1. El detector CMS
2. Sistema de Alineación de CMS
3. El sub- sistema de Alineación LINK de CMS
4. Calibración de componentes y Test de funcionamiento en condiciones de operación.
5. Instalación en CMS.
6. Resultados obtenidos por el LINK.
7. Personal del Ciemat que participó en el LINK.



El **sistema de alineación global LINK** de CMS, tiene la función de monitorizar de forma continua y precisa la posición de los espectrómetros de muones del BARREL y ENCAP, con relación al detector central de trazas (TRACKER), con precisiones de unas 150 μm en posición y 40 μrad en orientación. El sistema también realiza la alineación interna de los anillos ME1/1 y ME1/2 de las CSCs en el ENDCAP.

El sistema LINK, tiene simetría de 3 planos longitudinales, cada 60°, que se subdividen en 4 zonas simétricas, que tienen 6 regiones: **TRACKER**, $\eta=3$, **YN1**, **ME1/1**, **ME1/2** y **MAB**.



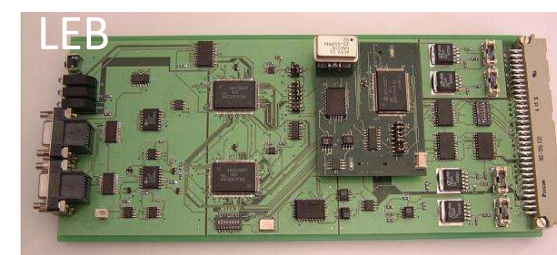
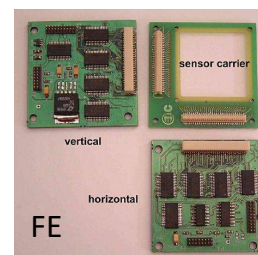
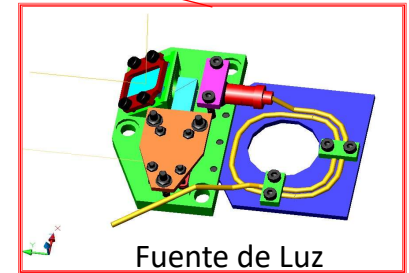
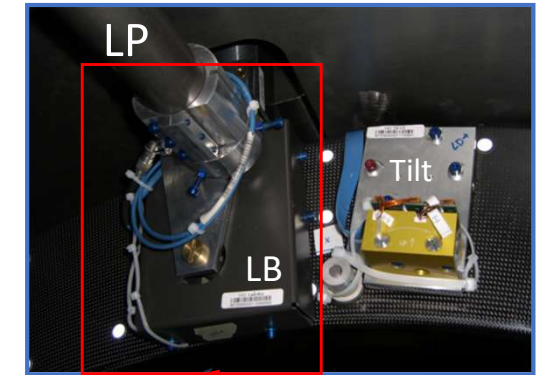
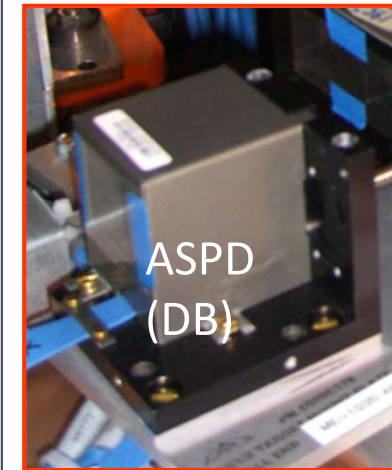
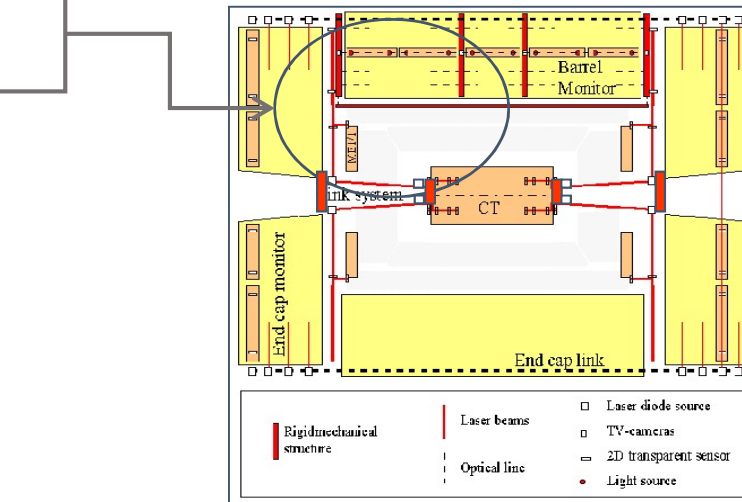
El subsistema de Alineación Global Link.

El sistema de Alineación Global LINK, del detector CMS, consiste en un conjunto de fuentes de luz que generarán haces láser de referencia y una serie de componentes opto mecánicos y de detección configurados de forma que constituyen lo que se denomina un **monitor de posición multipunto**.

Unidad básica 1/4 plano que liga (con haces láser y medidas de distancia) tracker y muones. (6+6)

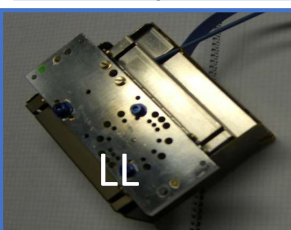
Componentes:

- **Diodos láser:** 670 nm de 30 mW (36 componentes).
 - Y Fibra Opticas y Colimadores.
- **Sensores:**
 - *Sensores matriciales semitransparentes de Silicio Amorfo (ASPD) (72) (Ciemat, IFCA y STAPD)*
 - *Angulares (Tilt Sensor) (10 (2D)+12 (1D)+12 (2D))*
 - *Distancia (Proximity Sensor) (41+24+12)*
 - *Temperatura (58)*
- **Componentes opto-mecánicos:**
 - *Fuentes de luz (Laser Box (LB)) (12)*
 - *Detector Box (DB) (72)*
 - *Nivel Laser (Laser Level (LL)) (12)*
- **Componentes mecánicos.**
 - *Perfiles medidas radials (RP) y longitudinales (LP).*
 - *Estructuras de alineación de Fibra de Carbono.*
 - *Link Disc (LD) (2)*
 - *Alignment Ring (AR). (2)*
 - *MAB (modules for the alignment of the Barrel) (12)*
 - *ME11 transfert plate (TP). (12)*
- Sistema de **lectura & control (FE (Front-End Electronics), LEB (Local Electronic Board)).**
- Software de **reconstruction COCOA (CMS Object-oriented Code for Optical Alignment)**



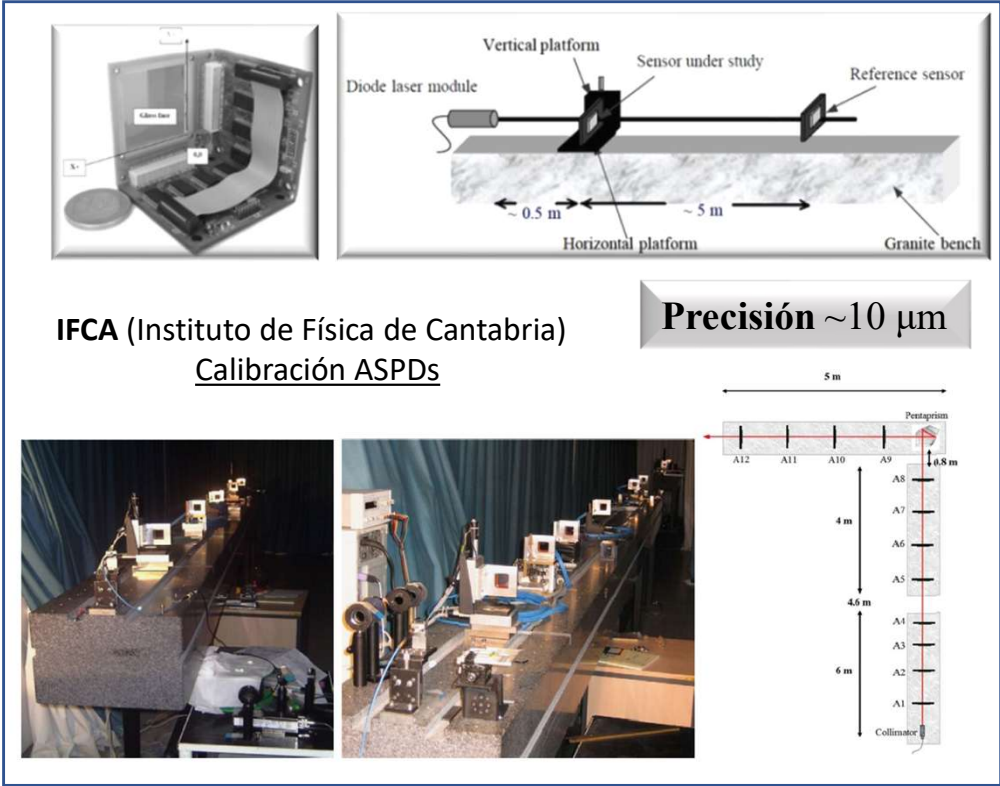
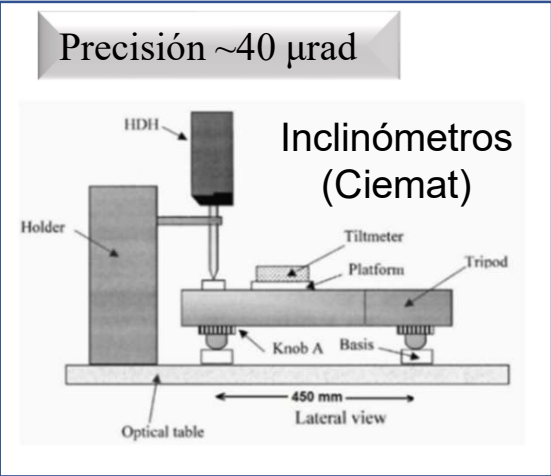
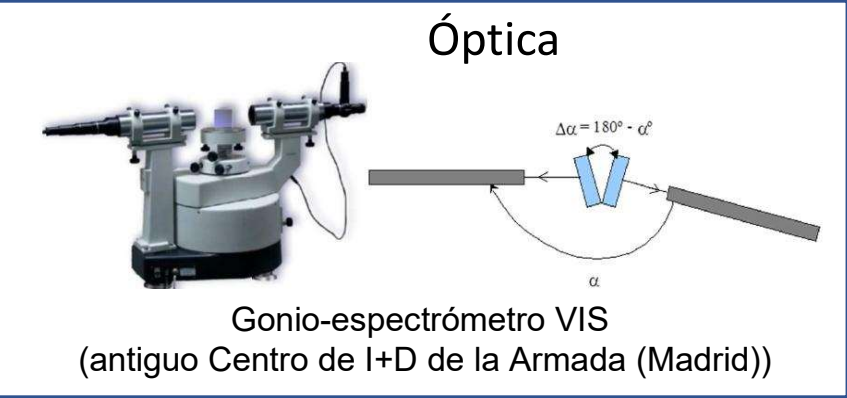
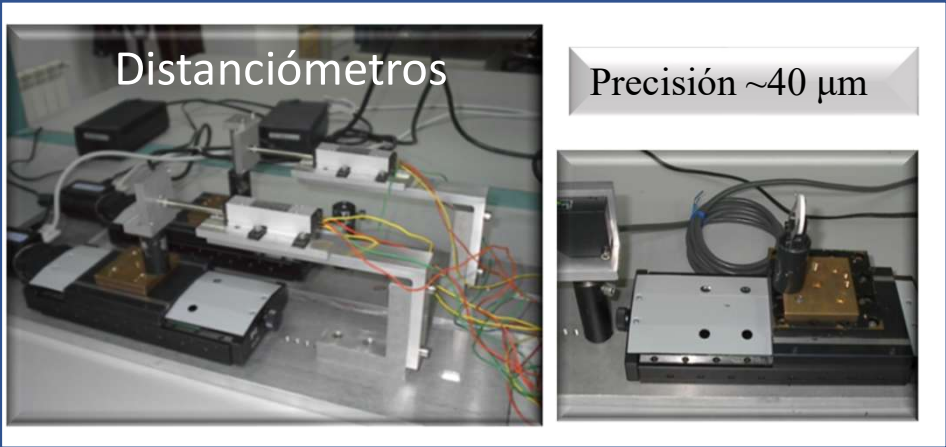
Prestaciones probadas:

- Sistema de alineación muy compacto (sistema LINK), para su implementación en CMS (Reto importante):
 - Con rangos de funcionamiento de varios centímetros y varios miliradianes.
 - Que puede operar con muy altos campos magnéticos de hasta 4 T.
 - Soportar altas dosis de radiación (10^5 Gy y 2×10^{14} neutrones/cm²).
 - Permite reconstruir de forma continua, con unas 150 μ m (y 40 μ rad) de precisión y resoluciones de 40 μ m (y 40 μ rad), la posición del sub-detector central de trazas, respecto al sub-detector de muones.
 - Estable a lo largo del tiempo.
- Caracterizado y validado en las condiciones de operación. Testeados los diferentes dispositivos individuales utilizados por el sistema de alineación LINK.



1. El detector CMS
2. Sistema de Alineación de CMS
3. El sub- sistema de Alineación LINK
4. Calibración de componentes y Test de funcionamiento en condiciones de operación.
5. Instalación en CMS.
6. Resultados obtenidos por el LINK.
7. Personal del Ciemat que participó en el LINK.

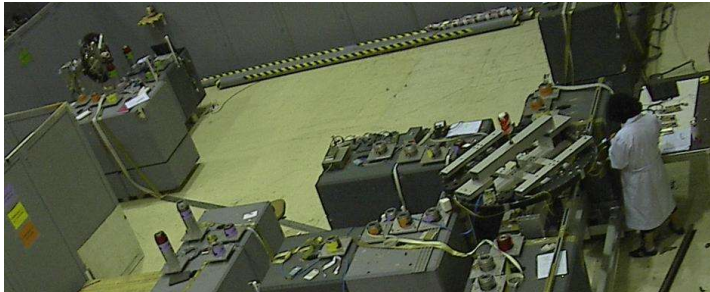
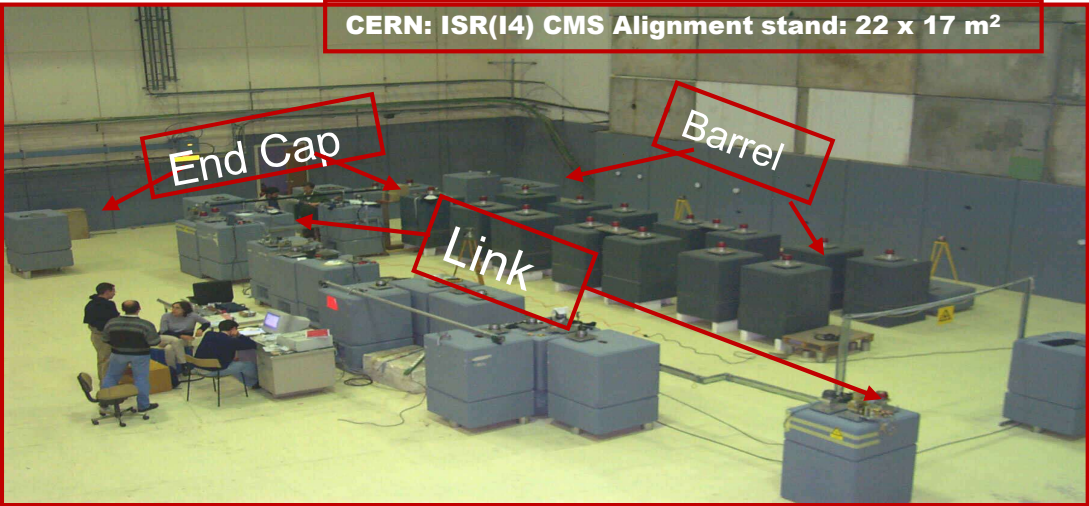
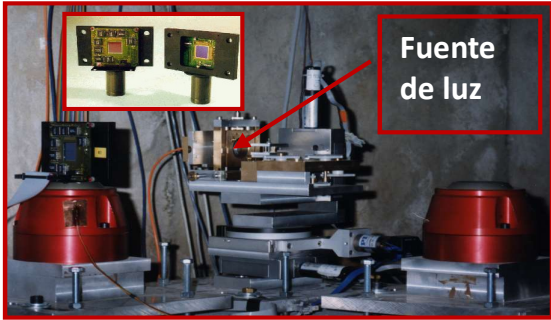
Calibración Distanciómetros, inclinómetros, ASPD, Óptica :



Tests con con $\bar{B}$ e irradiaciones de neutrones y gammas.

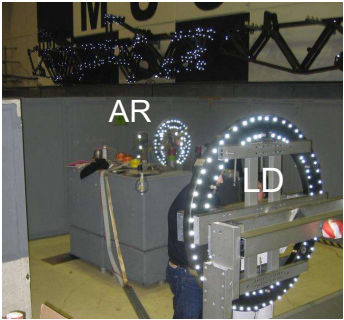
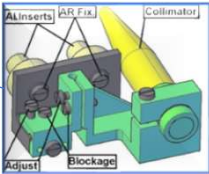
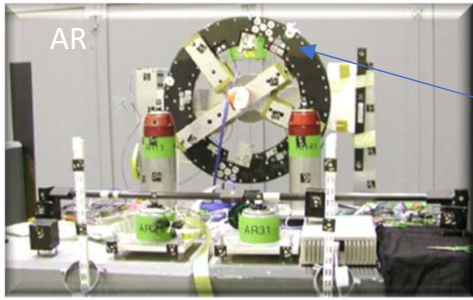
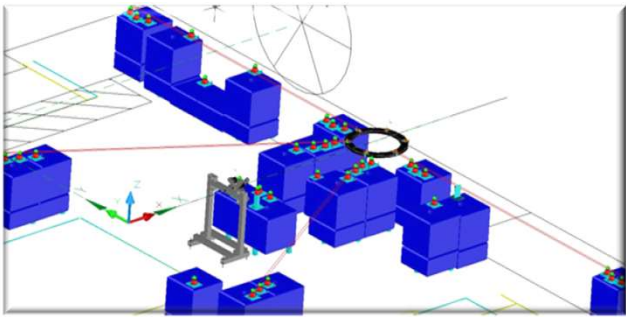
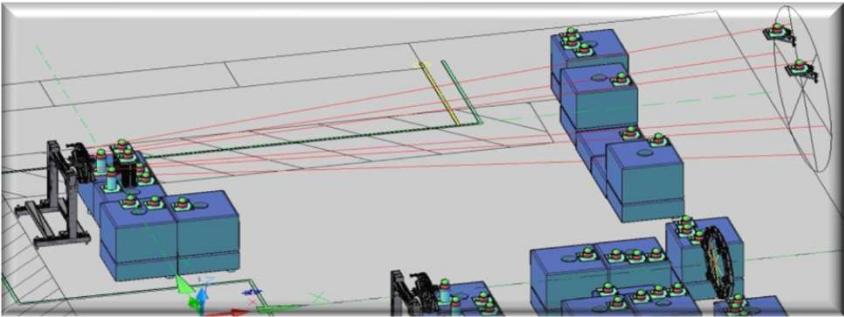


Áreas de Calibración en el CERN e IFCA.

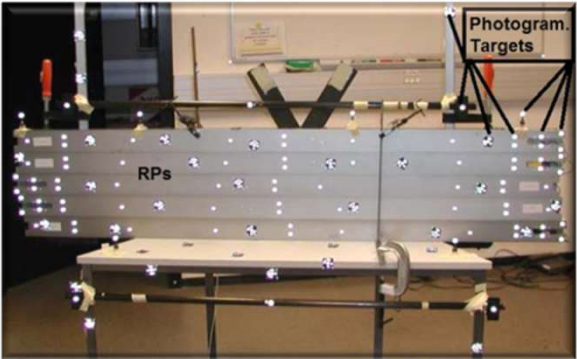
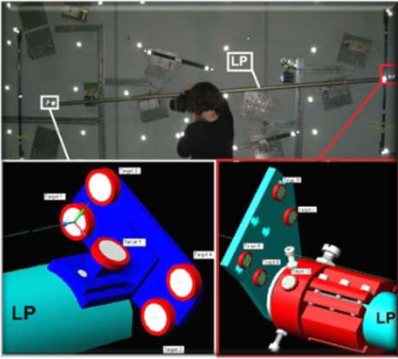
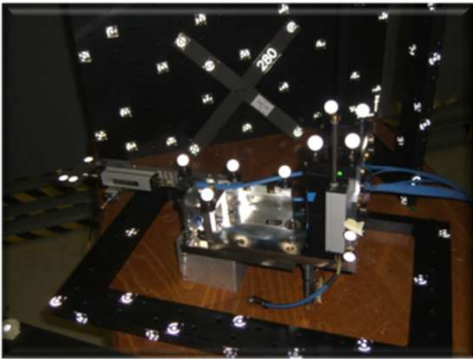
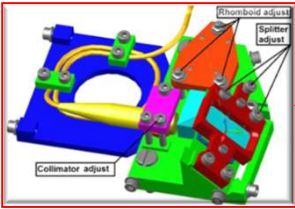


Calibración del AR y LD:

AR: Precisión obtenida: origen del haz $\sim 112 \mu\text{m}$ (RMS $\sim 12 \mu\text{m}$) y en la dirección de propagación del haz $\sim 84 \mu\text{m}$ (RMS $\sim 44 \mu\text{m}$).
LD: La precisión media en la determinación de los parámetros de $\sim 115 \mu\text{m}$ para los haces láser.

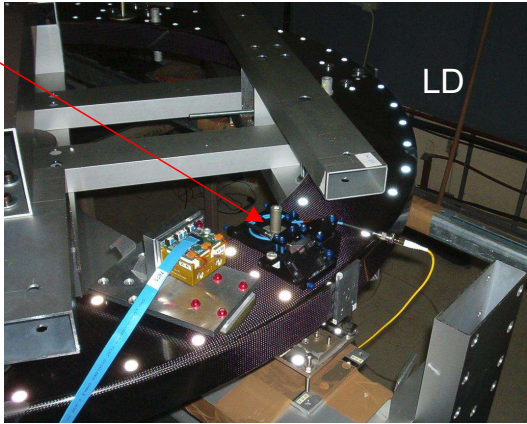


Calibración mediante fotogrametría digital: TP, LP (Perf. Longs.) y RP (P. Rad.).



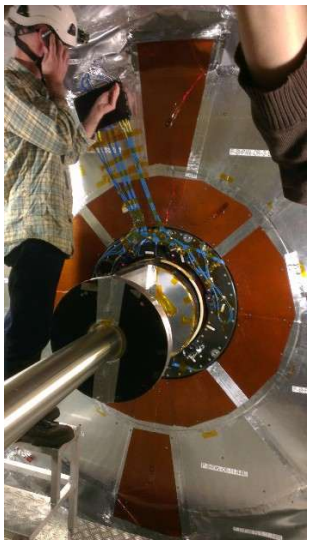
-TP, precisión $\sim 30 \mu\text{m}$.
-LP, precisión $\sim 30 \mu\text{m}$.
-RP, precisión $\sim 100 \mu\text{m}$

Global a CMS ($\sim 300 \mu\text{m}$)



1. El detector CMS
2. Sistema de Alineación de CMS
3. El sub- sistema de Alineación LINK
4. Calibración de componentes y Test de funcionamiento en condiciones de operación.
5. Instalación en CMS.
6. Resultados obtenidos por el LINK.
7. Personal del Ciemat que participó en el LINK.

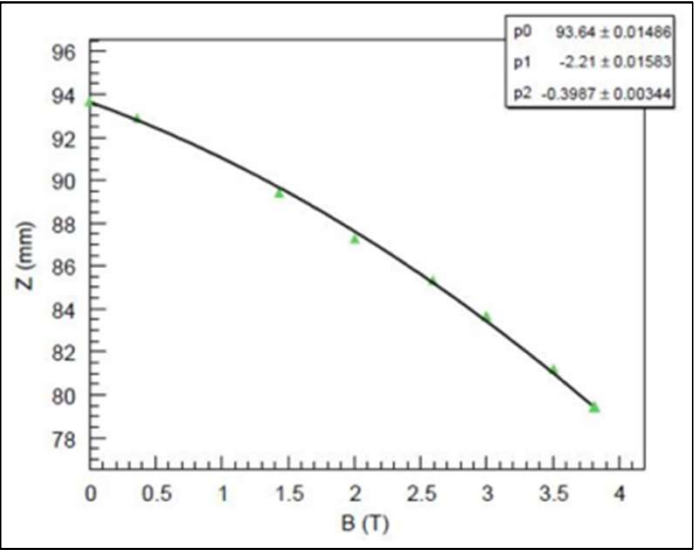
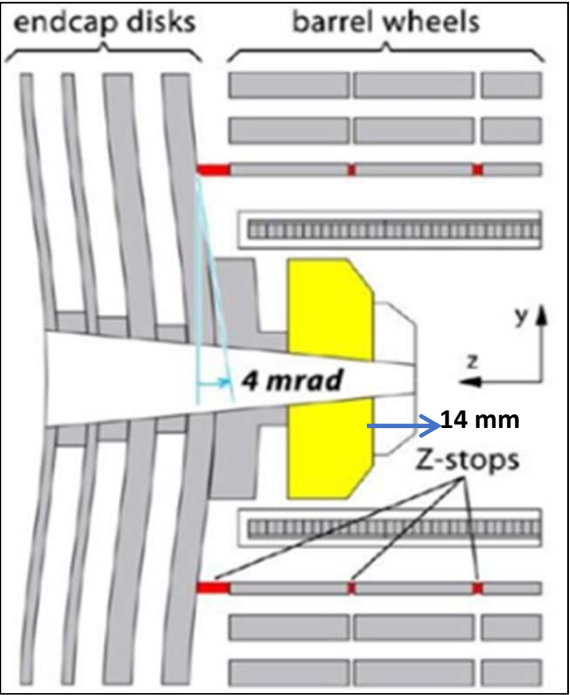
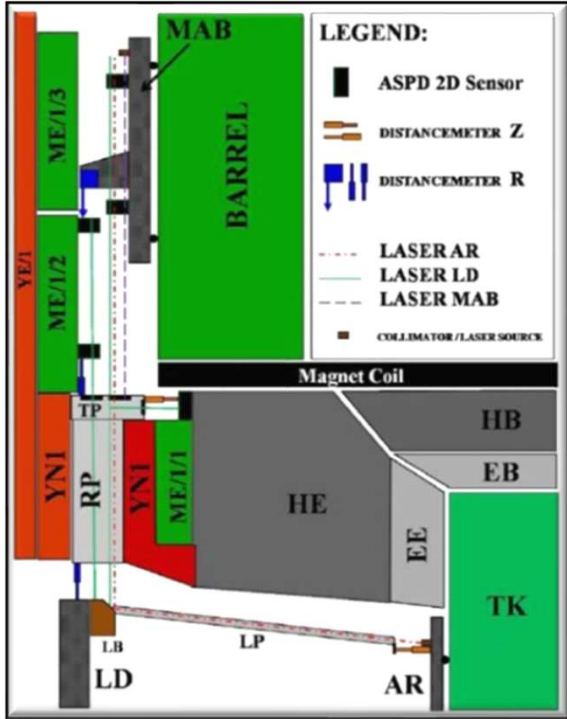
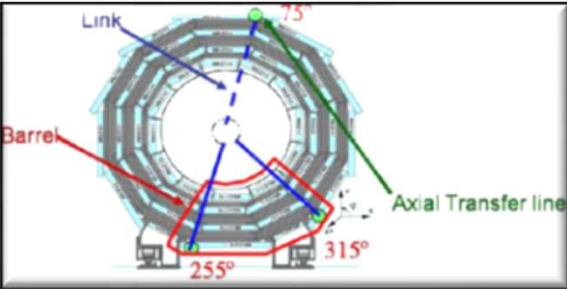
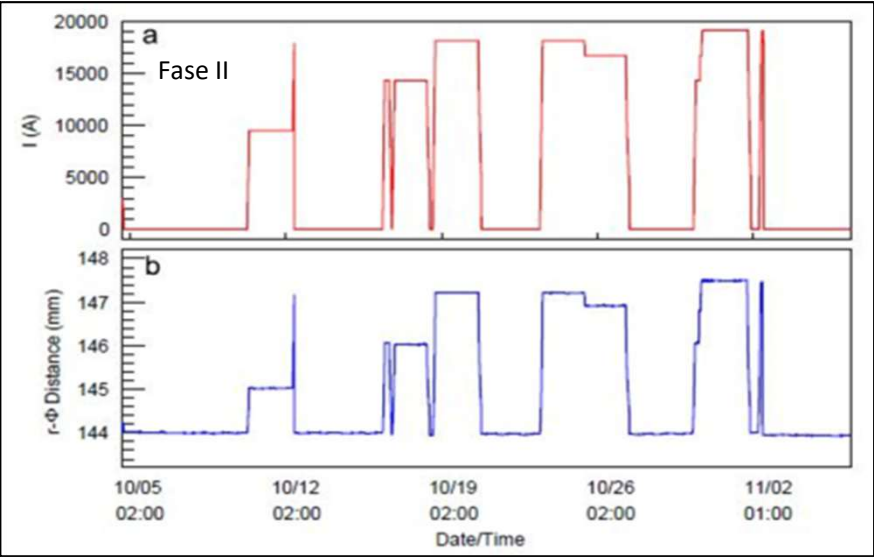
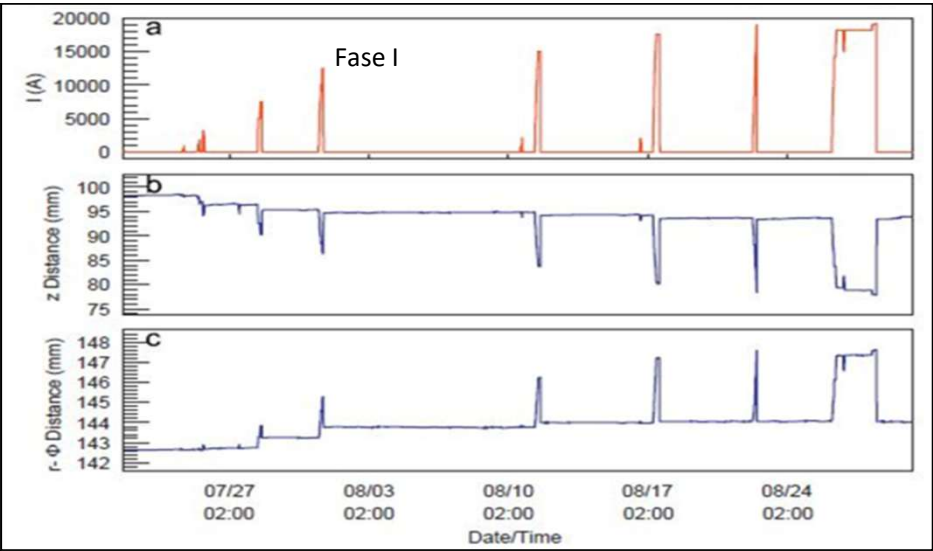
Instalación en CMS:



1. El detector CMS
2. Sistema de Alineación de CMS
3. El sub- sistema de Alineación LINK
4. Calibración de componentes y Test de funcionamiento en condiciones de operación.
5. Instalación en CMS.
6. Resultados obtenidos por el LINK.
7. Personal del Ciemat que participó en el LINK.

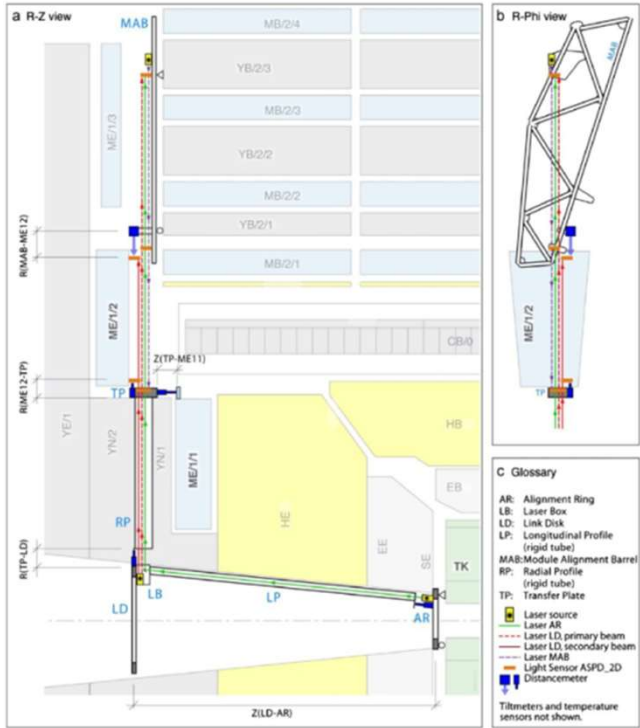
Resultados obtenidos por el Sistema de alineación LINK.

- Medidas de movimientos del LINK durante las pruebas del imán en 2006:
 - Movimientos detectados por el LINK (Inducidos por el campo magnético).



Movimientos máximos observados ~14 mm y ~4 mrad

- **Estabilidad de CMS entre 2008 y 2010 :**
 - tiempo necesario para que el detector CMS alcance su equilibrio estructural, al llegar a 3.8T.



Distancia y ángulos observados para evolución de la deformación (54 variables):

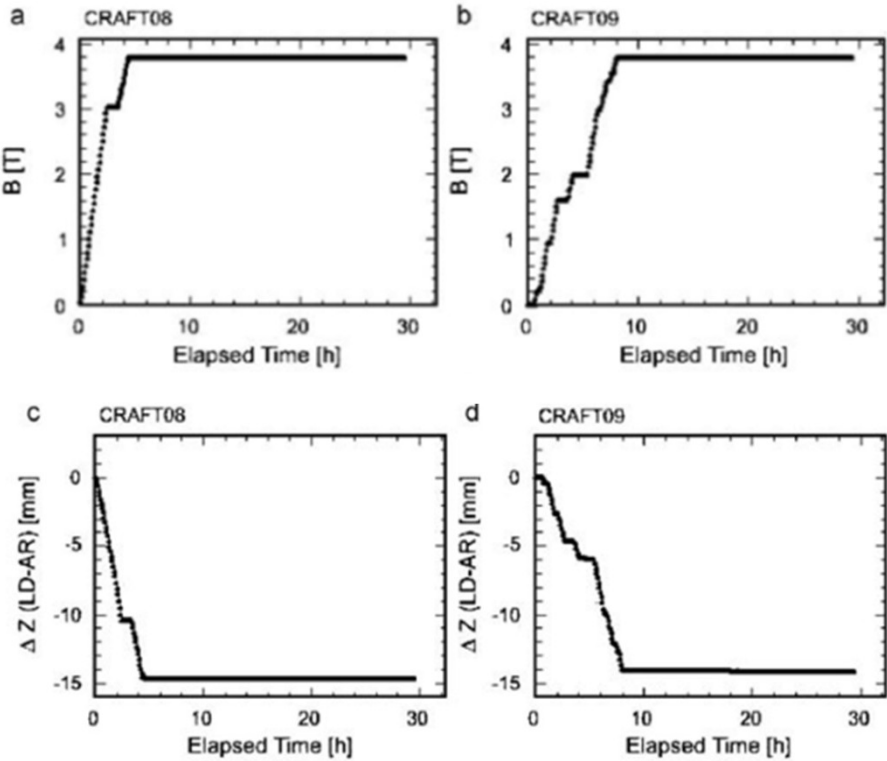
- R : (MAB-CSC ME1/2), (TP-CSC ME1/2)
- Z : (TP-CSC ME1/1), (LD-AR)
- ϕ (MAB)

Variable	CRAFT08	CRAFT09
ΔZ (LD-AR)	$\pm 14 \mu\text{m}$	$\pm 12 \mu\text{m}$
ΔZ (TP-ME1/1)	$\pm 26 \mu\text{m}$	$\pm 8 \mu\text{m}$
ΔR (MAB-ME1/2)	$\pm 10 \mu\text{m}$	$\pm 13 \mu\text{m}$
ΔR (TP-ME1/2)	$\pm 31 \mu\text{m}$	$\pm 23 \mu\text{m}$
$\Delta\phi$ (MAB)	$\pm 30 \mu\text{rad}$	$\pm 26 \mu\text{rad}$

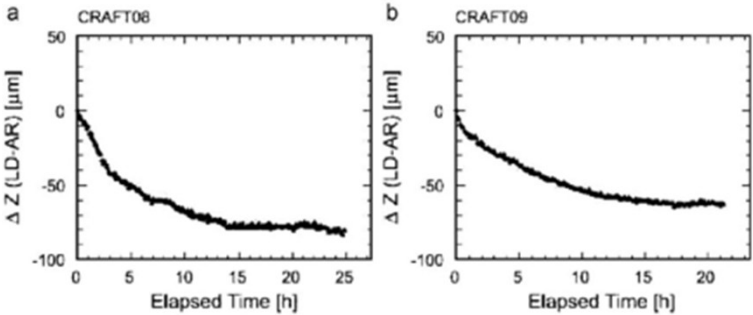
movimiento esperado para ΔZ , ΔR y $\Delta\phi$ después de transcurrir $T_s=13.5$ h
(Según datos obtenidos RUNs del CRAFT08 y CRAFT09)

Tiempo de estabilización: movimiento detectado a partir de ese momento < resolución de los sensores ($\sim 40 \mu\text{m}$ y $\sim 40 \mu\text{rad}$).

Las campañas se llamaron CRAFT08 y CRAFT09, ‘Cosmics Run At Four Tesla’



RUN de datos de estabilización.



Tiempo Estabilización: una vez alcanzado 3.8T en CMS.

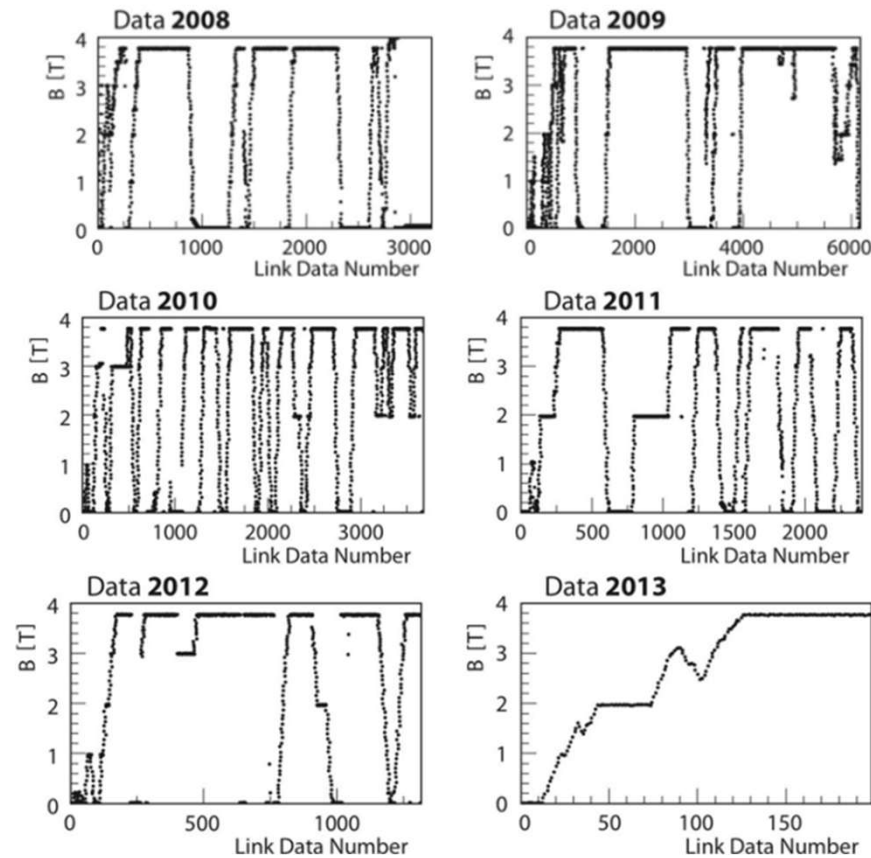
Variable	CRAFT08 T_s (h)	CRAFT09 T_s (h)
ΔZ (LD-AR)	3.5 ± 0.5	2.5 ± 0.5
ΔZ (TP-ME1/1)	10.5 ± 0.5	0.5 ± 0.5
ΔR (MAB-ME1/2)	2.5 ± 0.5	1.5 ± 0.5
ΔR (TP-ME1/2)	0.5 ± 0.5	0.5 ± 0.5
$\Delta\phi$ (MAB)	13.5 ± 0.5	12.5 ± 0.5

T_s . Estabilización para las 5 variables estudiadas (máx.. valores)

La estabilización de todas las variables observadas se alcanza 13.5 h después de llegar el imán al valor de 3.8 T.

- **Estabilidad y movimiento de las estructuras de CMS observadas por el LINK entre el 2008 y el 2013:**

- Movimientos inducidos por el imán a las estructuras mecánicas de CMS.
- Verificación de la estabilidad mecánica.



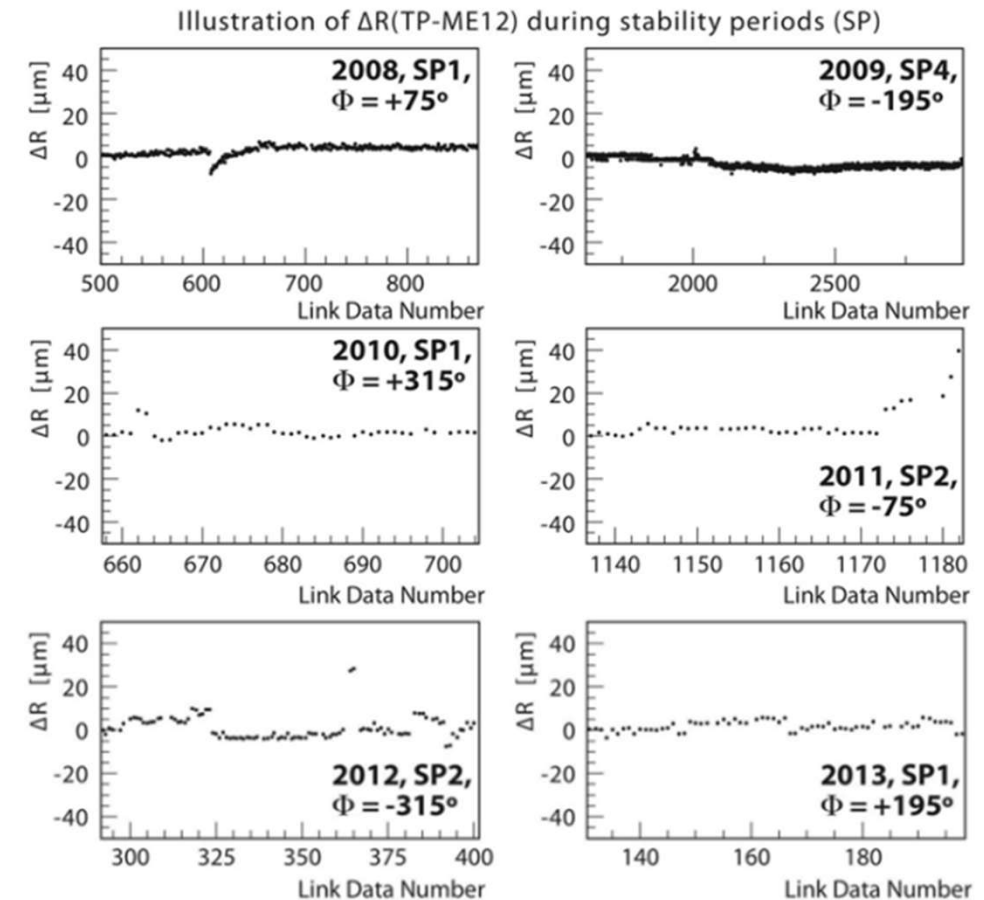
Campo magnético de CMS del 2008 al 2013, en función del número de dato tomado por el sistema LINK.

Year	Days of operation	Stability Days	Efficiency (%)
2008	87	9	10.3
2009	183	34	18.6
2010	322	242	75.2
2011	318	189	59.4
2012	322	263	81.7
2013	40	34	85.0
Total	1272	771	60.6

42 períodos de estabilidad del 2008 al 2013

Δ Distancia y Δ ángulos observados (48 variables):

- ΔR : (MAB-CSC ME1/2), (TP-CSC ME1/2)
- ΔZ : (TP-CSC ME1/1)
- $\Delta\phi$: (MAB)



Estas variables estudiadas han permanecido estables a lo largo de esos años, cuando el imán trabajaba a 3.8T, tras pasar el tiempo de estabilización definido.

1. El detector CMS
2. Sistema de Alineación de CMS
3. El sub- sistema de Alineación LINK
4. Calibración de componentes y Test de funcionamiento en condiciones de operación.
5. Instalación en CMS.
6. Resultados obtenidos por el LINK.
7. Personal del Ciemat que participó en el LINK.

Personal del Departamento de Tecnología e Investigación Básica del Ciemat
que formaron parte del diseño, desarrollo, construcción, calibración, instalación y puesta en servicio del sistema de alineación LINK de CMS

Diseño y Desarrollo, requirió unos 10 años.

Construcción: preparación de las tarjetas, módulos de lectura y control, sus encapsulados y racks, así como todos los cables y conectores que dan servicio al sistema de alineación LINK, fueron realizados en el Ciemat, a lo largo de varios años de trabajo.

Calibración y Caracterización, de los componentes ensamblados en el laboratorio del IFCA y CIEMAT, (unas 2 personas durante 3 años integrados). Y en el CERN, se montaron y calibraron las estructuras de alineación en bancos opto-mecánicos desarrollados para tal fin (unas 3 personas durante 2 años integrados). Estas tareas fueron compartidas con el personal de IFCA.

Programación para instrumentar los sistemas de caracterización preparados a lo largo de los años, requirió muchos meses de trabajo.

programa de reconstrucción global de movimiento de objetos **COCOA** (acrónimo de CMS Object-oriented Code for Optical Alignment), necesitó años de trabajo para ponerlo a punto.



*Personal del Departamento de Tecnología e Investigación Básica del Ciemat
que formaron parte de la fabricación, test de irradiación, instalación y puerta en servicio del sistema de alineación LINK de CMS*

Fabricación de 4.500 piezas mecánicas producidas para el LINK, la mayoría en los talleres del CIEMAT, de ellas unas 2000 de precisión (con Hoja de Calibración), para ello se necesitó unos 7 años de trabajo.

Tests irradiación: en la instalación Náyade del Ciemat se realizaron test de validación de todos los componentes electrónicos, ópticos y detectores del sistema LINK, tareas que requirieron muchos meses de preparación y operación.

Instalación de unos 10 km de cables y unos 5 km de fibras ópticas, que requirió 3 a 4 personas durante unos 6 a 7 meses integrados en el CERN (junto con personal del IFCA). Así como la instalación del resto de componentes del sistema en CMS, para lo que se necesitaron unas 3 personas durante 9 meses integrados. Y 5 personas para el **ajuste** durante varios meses, en períodos discontinuos.

