

Memoria presentada para la obtención del
Diploma de Estudios Avanzados
en el programa Física Fundamental
de la Universidad Complutense de Madrid

**Física Experimental de Altas Energías y
Aceleradores:**

**Sistema de producción distribuida en el LHC
Computing Grid para el experimento CMS**

José Caballero Béjar - CIEMAT

Supervisores: Pablo García Abia, José María Hernández Calama - CIEMAT

14 de junio de 2006

1. Introducción

El *Large Hadron Collider* (LHC) [1], colisionador protón-protón que está siendo construido en el Laboratorio Europeo para la Física de Partículas (CERN) [2] en Ginebra (Suiza), ha sido concebido y diseñado para aclarar algunas de las cuestiones abiertas más importantes de la física de partículas actual, como la búsqueda de una descripción completa y satisfactoria de las interacciones entre partículas elementales. LHC empezará a tomar datos a finales del año 2007. Su principal objetivo es la búsqueda del bosón de Higgs, así como el estudio de otros fenómenos en la escalas de energías del TeV. También permitirá validar o descartar otros modelos propuestos como alternativa al Modelo Estándar de Física de Partículas, como la Supersimetría.

Cuatro experimentos operarán en el LHC. ATLAS [3] y CMS [4] son experimentos multipropósito, diseñados para descubrir el bosón de Higgs en un amplio rango de energías. Un experimento, LHCb [5], estará dedicado en exclusiva al estudio de la física del quark *bottom*, en particular al estudio de la violación de la simetría CP. Por último, ALICE [6] estará centrado en las colisiones de iones pesados, para estudiar las interacciones de la materia en condiciones de muy alta densidad de energía, mediante interacciones entre núcleos, donde se espera la formación de un nuevo estado de la materia, el plasma quark-gluon.

Los diversos procesos de producción del bosón de Higgs poseen una sección eficaz¹ de producción extraordinariamente baja comparada con la sección eficaz total protón-protón. En LHC se espera que sólo una de cada 10^{10} colisiones produzca un bosón de Higgs, aproximadamente. Para compensar unas secciones eficaces de producción tan bajas, LHC operará con una elevadísima luminosidad² (10^{34} cm⁻²s⁻¹) y a una alta energía en el centro de masas (14 TeV), valores sin precedentes que suponen un reto científico y tecnológico. La frecuencia de interacciones protón-protón alcanzará un valor de 1 GHz, que después de pasar por un primer sistema de pre-selección *on-line* dará lugar a una frecuencia de sucesos aceptados por CMS de unos 150 Hz. Típicamente, cada evento necesita aproximadamente 1.5 MB de memoria para ser almacenado, y teniendo en cuenta que el acelerador operará durante 10^7 segundos por año, las necesidades totales de almacenamiento son de aproximadamente $2,25 \cdot 10^6$ Gigabytes por año para guardar toda la información útil procedente del detector. Serán necesarias varias decenas de miles de ordenadores actuales para procesar, simular y analizar tal ingente cantidad de datos. El volumen total de datos simulados y reconstruidos alcanzará un valor de varias decenas de Petabytes. La tabla 1 muestra las necesidades en potencia de cálculo y capacidad de almacenamiento estimadas para los primeros años de operación del experimento CMS.

	2007	2008	2009	2010	
CPU	21.9	43.8	67.2	116.6	MSI2k ³
Disco	4.1	13.8	23.3	34.7	PB
Cinta	5.4	23.4	41.5	59.5	PB

Tabla 1: Recursos de computación necesarios durante los cuatro primeros años de operación de CMS

Dada la escala de los recursos de computación requeridos, el modelo de computación tradicional de los experimentos de física de altas energías, basado en la acumulación de la mayor parte de los recursos computacionales en el laboratorio donde está instalado el acelerador, resulta inadecuado. Por una variedad de razones es difícil concentrar la ingente cantidad de recursos que se van a poner en juego en una única localización. Recursos, no sólo de hardware sino también, lo que es más importante, de personal

¹La sección eficaz es proporcional a la probabilidad de ocurrencia del proceso físico considerado.

²La luminosidad es proporcional a la frecuencia de interacciones y al número de partículas del haz, e inversamente proporcional a la sección transversal del mismo. El producto de la sección eficaz por la luminosidad equivale al número de sucesos por segundo para un proceso determinado.

³Un KSI2k equivale a un ordenador actual.

cualificado, infraestructuras y servicios de soporte. En LHC, los institutos que componen los experimentos aportan localmente los recursos de computación, y dichos experimentos han diseñado un modelo computacional donde todos estos recursos, distribuidos geográficamente, están interconectados mediante redes de Internet de gran ancho de banda. Una nuevo conjunto de tecnologías, las llamadas tecnologías Grid [7], se encargan de operar estos recursos de manera coherente y transparente.

Este nuevo modelo computacional de recursos ampliamente dispersos geográficamente pero interconectados entre sí es, en cierta manera, análogo a la red eléctrica convencional. La red eléctrica distribuye un servicio (suministro de energía) a una amplia región geográfica, donde cualquier usuario puede hacer uso de dicho servicio ofrecido por el sistema sin más que conectar cualquier electrodoméstico a la red. En el caso de Grid, el servicio que se ofrece y distribuye son recursos de computación, y todos los usuarios pueden hacer uso de ellos conectándose al sistema a través de cualquiera de los PCs que dan acceso al mismo. Al igual que en el caso de la red eléctrica, el acceso de los usuarios al servicio debe ser transparente, ubicuo y potente. De igual forma que la web (proyecto que también nació en el CERN, y que puede ser considerado como progenitor del Grid) es un sistema para compartir información, el Grid, dando un paso más, es un sistema de uso distribuido de recursos de cálculo, almacenamiento y distribución de datos. Por tanto, no cabe duda de que, al igual que con su predecesor, el futuro del Grid es potencialmente revolucionario.

Por otro lado, antes de que LHC empiece a tomar datos, la generación masiva de datos simulados mediante técnicas de Monte Carlo (MC) será crucial para los estudios de física, así como para alcanzar una mejor comprensión del detector. Los experimentos de física de altas energías dependen críticamente de la precisión de los generadores y de las simulaciones del detector. Los sucesos simulados son necesarios para la optimización del diseño del detector, su calibración, y los estudios de física. La magnitud de las incertidumbres asociadas al descubrimiento de partículas, o la medida de sus masas o secciones eficaces, está muy relacionada con la precisión con la que las simulaciones describen el funcionamiento del detector midiendo electrones, fotones y hadrones. Por tanto, es esencial para el éxito de un experimento de física de altas energías una buena comprensión y ajuste de las herramientas de simulación que estén en buen acuerdo con las medidas reales.

Queda claro que para llevar a la práctica con éxito ambos objetivos (el análisis de los datos y la generación masiva de muestras Monte Carlo) un gran sistema computacional que agrupe todos los recursos disponibles se hace indispensable. No sólo se requiere una gran potencia de cálculo, sino que también son necesarios enormes recursos de almacenamiento masivo de datos. Los experimentos del LHC están realizando un gran esfuerzo para implementar estos nuevos modelos computacionales basados en las tecnologías Grid. LCG [8] (LHC Computing Grid) puede ser considerado un quinto experimento, dada su complejidad y magnitud. Es evidente que la producción masiva de datos Monte Carlo es de importancia incuestionable para el experimento, a parte de por su interés intrínseco, pues es una excelente herramienta para validar todo la infraestructura computacional que se está desarrollando e implementando.

Los objetivos de este trabajo son la implementación y uso de un sistema de producción masiva de datos Monte Carlo en LCG para el experimento CMS. Durante una primera fase el software oficial de producción fue adaptado para trabajar en un entorno Grid. A esta primera adaptación le siguió una segunda fase de mejoras. Tras su implementación, el nuevo sistema de producción se usó de forma masiva. Se describirá la estrategia usada, los problemas encontrados y los resultados obtenidos.

2. Adaptación del sistema de producción al entorno Grid

2.1. Arquitectura del LHC Computing Grid

La arquitectura de los sistemas Grid suele describirse en términos de capas o niveles, donde cada una desempeña una función específica. En general, las capas superiores se encargan de ofrecer servicios a los

usuarios, mientras que las capas inferiores se centran en el hardware. Así, el nivel más bajo es el encargado de gestionar las redes, asegurando la conectividad entre los nodos del Grid, y sobre éste, el siguiente nivel aglutina todos los recursos (tales como computadores, sistemas de almacenamiento de datos, catálogos de datos electrónicos, etc.) que se conectan directamente a estas redes. Una capa intermedia está integrada por las herramientas de software que permiten organizar e integrar todos estos recursos, permitiendo su participación de forma conjunta y coherente en un entorno de trabajo Grid. Por último, la capa superior ofrece a los usuarios las aplicaciones finales que les permiten hacer uso, de forma transparente, de toda la infraestructura.

Todo un conjunto de servicios diferentes son necesarios para ejecutar un trabajo en el Grid. La figura 1 muestra un esquema de la organización de estos servicios. La puerta de acceso al Grid, y que permite usar todos los recursos disponibles en él, es una máquina conocida como *User Interface* (UI). Los trabajos son enviados desde esta UI. Todos los ficheros necesarios, junto con el propio programa a ejecutar, se envían juntos en un paquete conocido con el nombre de *Input SandBox*. La UI envía el trabajo a otra máquina llamada *Resource Broker* (RB), que está en permanente contacto con una serie de servicios de información Grid y que le permiten determinar en qué sitios se cumplen los requisitos necesarios, y cuál de estos sitios es el más adecuado en cada momento para ejecutar el trabajo. Una vez que el sitio idóneo ha sido seleccionado el trabajo es enviado allí y es ejecutado en alguno de los PCs locales, conocidos como *Worker Nodes* (WN). El servicio que da acceso a ese conjunto de WNs en cada sitio es conocido como *Computing Element* (CE). Si una vez finalizada la ejecución se han generado datos que deben ser guardados, éstos son enviados a alguno de los sistemas de almacenamiento, conocidos con el nombre de *Storage Elements* (SE), y deben ser registrados en el catálogo central de LCG asociado al experimento CMS para reflejar su localización. Algunos de los ficheros de salida generados por el trabajo (de tamaño moderado) son enviados al usuario, de nuevo a través del RB, en un paquete llamado *Output SandBox*.

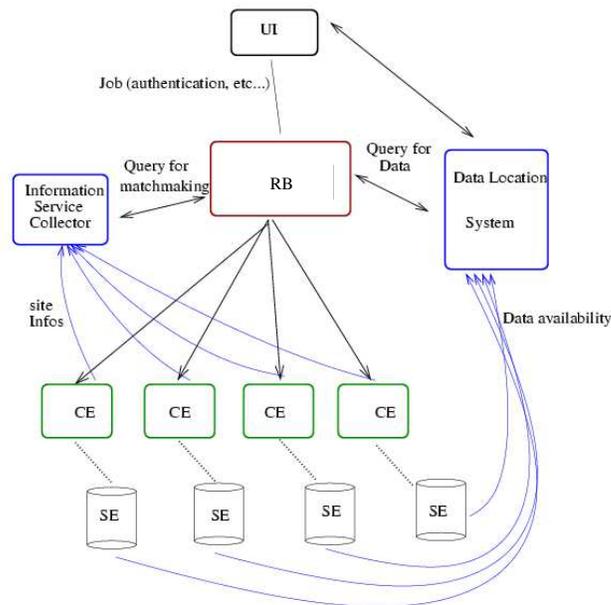


Figura 1: Esquema de los componentes básicos de la arquitectura del LCG

En el modelo computacional implementado por CMS [9] estas infraestructuras y servicios están organizados en una estructura jerárquica de niveles (o *Tiers*), donde cada sitio tiene asignada una serie de tareas concretas en función del nivel al que pertenece: copia de seguridad de los datos tomados por el detector o de las datos simulados, preselección de datos, análisis, simulación de datos, etc. Los institutos españoles

que forman parte de esta estructura son el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Energéticas (CIEMAT), el Instituto de Física de Cantabria (IFCA) y el Puerto de Información Científica (PIC).

2.2. El sistema de producción de datos simulados de CMS

La cadena de producción de datos simulados de CMS comprende diversas etapas. Durante la generación se simulan las colisiones, determinándose las partículas obtenidas así como las propiedades cinemáticas de los sucesos. Estas partículas generadas constituyen el input de la simulación, donde se calcula su interacción con el detector. En este paso se tienen en cuenta una gran variedad de procesos físicos que describen las interacciones de las partículas con la materia. La simulación necesita, por tanto, una completa descripción de la geometría del detector y del campo magnético. Para conseguir una mayor precisión hay que tener en cuenta la gran cantidad de colisiones pp inelásticas y difractivas que se producirán en cada cruce de haces, y que también producirán señal en el detector. Además, hay que considerar también las partículas procedentes de cruces anteriores y posteriores al actual, dependiendo de la velocidad de la electrónica de lectura del detector. Todos estos fenómenos reciben el nombre común de *pile-up* (PU), y requieren un tratamiento especial. La simulación de las señales emitidas por la electrónica del detector se conoce con el nombre de digitalización. Finalmente, la reconstrucción es la operación por la cual se calculan cantidades físicas de las partículas, como la energía y el momento, a partir del output de la electrónica.

Cada una de estas etapas se realiza por separado por diversas razones. Los paquetes de software necesarios, por ejemplo, son diferentes para cada paso. El tiempo necesario para procesar cada suceso difiere drásticamente entre etapas. La generación es un proceso considerablemente más rápido que la simulación, mientras que la reconstrucción y la digitalización tienen unos requisitos intermedios. Este desacoplamiento entre etapas permite la repetición de la reconstrucción para tener en cuenta mejoras en el software, nuevas calibraciones o diferentes algoritmos de reconstrucción, sin necesidad de rehacer la simulación.

Los grupos de física solicitan la simulación de sucesos para un determinado proceso físico, especificando un conjunto bien definido de parámetros, versión del software, muestra de PU y una geometría bien definida. Por razones prácticas, dichas solicitudes son divididas en pequeñas colecciones formadas por varios trabajos, cada uno de los cuales procesa típicamente unos 1000 sucesos.

La herramienta oficial de CMS para la simulación de datos mediante técnicas de Monte Carlo es un paquete de software llamado McRunjob [10]. Esta herramienta ha sido usada durante muchos años con éxito para realizar la producción Monte Carlo en granjas locales de PCs. En una primera fase, McRunjob se pone en contacto con una base de datos específica (RefDB) de donde obtiene toda la información necesaria para la preparación de los trabajos: lista de sucesos a simular, cartas de datos con información específica sobre dichos sucesos, especificaciones sobre los datos de entrada, una plantilla para generar el trabajo que se va a ejecutar, etc. Una vez que los trabajos son creados apropiadamente, McRunjob está instrumentado para enviarlos para su ejecución a granjas de PCs locales manejadas por diferentes sistemas de gestión de colas, así como para monitorizar su estado.

Los trabajos de generación suelen ser bastante cortos (unos pocos minutos de CPU) y requieren poco espacio para guardar los datos que originan (pocas decenas de Megabytes). La simulación, por el contrario, es un proceso bastante más largo (con trabajos de entre 24 a 48 horas), hace un uso intensivo de CPU, y produce una gran cantidad de datos (~ 500 MB). Los procesos de digitalización son de duración intermedia (de 5 a 10 horas), el tamaño de los datos producidos es similar al de la simulación, La digitalización requiere acceso directo a las muestras de datos simulados de PU. Por último, los trabajos de reconstrucción son relativamente cortos (pocas horas) y producen menos datos (~ 200 MB). Una vez concluida la simulación de una colección completa de eventos, los datos obtenidos han de ser leídos para la creación de unos ficheros, conocidos como *metadatos*⁴, necesarios para la digitalización. De igual forma

⁴datos sobre los datos: definen la estructura y significado de los ficheros de datos.

se crean ficheros de metadatos con la información de la simulación y la digitalización para poder ejecutar la reconstrucción, y otros con información de todas las etapas, cuando el proceso completo ha concluido, para hacer posible el análisis de los datos.

2.3. Adaptación del sistema de producción al Grid

El sistema de producción descrito no estaba preparado para su ejecución en un entorno Grid. Durante una primera fase fue necesario un gran esfuerzo para instrumentar adecuadamente todo el sistema permitiéndole operar en un entorno ampliamente distribuido donde los recursos no siempre son accesibles directamente.

La figura 2 muestra el acoplamiento del sistema de producción con la estructura general del LCG. Los trabajos son enviados al Grid, en lugar de a granjas locales de PCs, a través del RB, y ejecutados en aquellos sitios donde previamente haya sido instalada la versión necesaria del software del experimento. Los datos de entrada necesarios se copian desde el SE donde están almacenados al disco local del WN. Esta operación es más rápida y fiable si se realiza dentro de un mismo nodo Grid que entre nodos, pues las redes internas son más fiables y de mayor ancho de banda que las redes externas entre sitios. Teniendo en cuenta este factor se adoptó como estrategia general guardar los resultados de la simulación (y digitalización), usualmente de gran tamaño, en el SE del nodo donde luego se ejecutaría la digitalización (y reconstrucción) minimizando así el riesgo de fallo durante la copia de estos datos. Una vez finalizado el trabajo, los datos producidos son copiados desde el disco local a un SE. La ubicación de estos datos obtenidos debe ser registrada en el catálogo central del LCG.

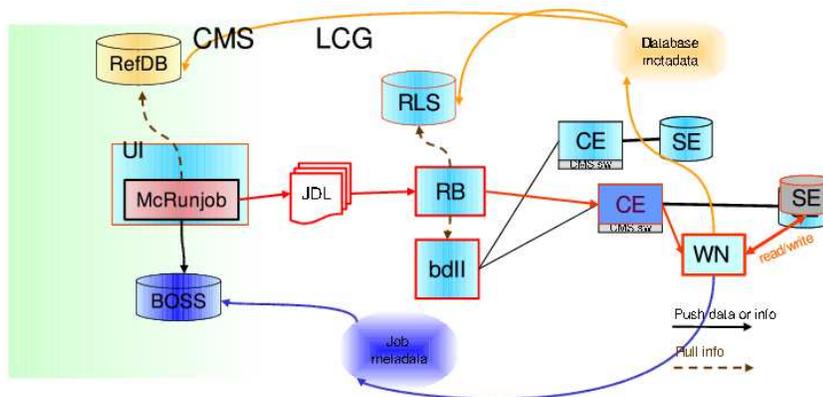


Figura 2: Flujo de trabajo de la producción MC en Grid para CMS

Para conseguir la superposición de los procesos de pile-up se generan con antelación una serie de muestras con este tipo de sucesos. Para garantizar la aleatoriedad de los sucesos que en cada momento se seleccionen estas muestras son de gran tamaño (~100 GB), por lo que han de ser transferidas, antes de su lectura, a algunos sitios del Grid permitiendo así que los trabajos de digitalización que las necesitan tengan acceso directo a ellas. Estos trabajos de digitalización, por tanto, sólo pueden ser enviados a estos sitios preseleccionados.

Una de las principales razones que dificultaron la migración del sistema de producción al Grid es la generación de los metadatos. Esta operación requería acceso directo a todos los datos de la colección completa que se está procesando y, puesto que éstos pueden estar distribuidos entre varios SEs, recolectarlos todos en una única localización resulta muy ineficiente. Para solventar esta dificultad se introdujo el concepto de Generación Atómica de Metadatos. Ahora cada trabajo genera él mismo, antes de empezar, los metadatos

correspondientes a los sucesos que va a procesar, y no necesita acceso a los metadatos para la colección completa de sucesos. Esta operación es ahora muy sencilla y se realiza localmente en el WN.

Varias herramientas de monitorización se han acoplado al sistema de producción. Una de ellas, BOSS [11] (*Batch Object Submission System*), hace uso de una base de datos local que es actualizada periódicamente por los trabajos que se están ejecutando en el Grid, que acceden a ella a través de Internet. Esta información queda, por tanto, guardada de forma permanente en dicha base de datos y puede ser consultada en cualquier momento. La otra herramienta usada, MonaLisa [12], proporciona mayor cantidad de información, accesible a través de la web, aunque su tiempo de vida es limitado. Gracias a estas herramientas es posible saber en tiempo real el estado de todos los trabajos. Esto permite identificar rápidamente los que han sido cancelados o abortados, lo que se traduce en un tiempo de reacción increíblemente corto. Por otro lado, el estudio de la información almacenada en la base de datos permitió identificar los sitios Grid con mayor tasa de fallos. De esta forma el sistema de producción iba consiguiendo reducir progresivamente la lista de nodos poco fiables, trabajando sólo con aquellos que ofrecen un mejor rendimiento. Así, el sistema de producción ha ganado en eficiencia de manera constante.

2.4. Mejoras en el sistema de producción en Grid

Tras la adaptación del sistema de producción de Monte Carlo al Grid del LCG descrita en este trabajo los primeros resultados conseguidos fueron poco satisfactorios, con una alta tasa de fallos debida a razones tan diversas como problemas temporales con los catálogos globales de datos, con la instalación del software del experimento, la configuración de cada nodo o problemas leyendo y escribiendo datos en los SEs. Además, los tiempos excesivamente altos necesarios para enviar trabajos y recuperar los resultados hacen difíciles las tareas de desarrollo y verificación. A diferencia de las granjas de PCs locales, donde todos los recursos son conocidos y están controlados directamente, el Grid es aún un sistema poco robusto y poco fiable, donde los recursos disponibles son heterogéneos y no se tiene acceso directo a ellos. Además, operar en un entorno Grid incluye la realización de una serie de tareas e interaccionar con un conjunto de servicios novedosos, de los que no era necesario hacer uso en las producciones locales. Una mejor comprensión de estos nuevos servicios y metodología de trabajo se convirtió en un factor clave para la mejora de la eficiencia y de la productividad. Fue imprescindible, por tanto, introducir algunas mejoras en el sistema para conseguir una buena tasa de producción.

Para disminuir el tiempo de envío de los trabajos, así como el riesgo de fallo debido al mismo, se ha reducido al mínimo el tamaño de los ficheros que son enviados en el Input SandBox. De igual forma se ha reducido el número de ficheros que se recuperan mediante el Output SandBox. Además, todos los ficheros con resultados se han empaquetado en un único fichero con formato ZIP⁵, evitando así la manipulación de muchos ficheros de pequeño tamaño, más difíciles de gestionar en los SEs.

Durante la primera fase, el sistema de producción de Monte Carlo estaba desacoplado del sistema de transferencia de datos que CMS ha desarrollado. Las transferencias de datos entre nodos debían hacerse manualmente, usando las herramientas básicas proporcionadas por el Grid. Sin embargo, dichas herramientas son aún bastante rudimentarias, poco fiables y no tolerantes a fallos. Los movimientos de datos se hacían mediante ficheros individuales y la comprobación de que las transferencias se completaban correctamente debía hacerse manualmente. En el caso de la producción en LCG la fiabilidad y rapidez de las transferencias es aún más importante que en el caso de la producción local tradicional pues los datos suelen estar dispersos en gran cantidad de sitios. CMS ha desarrollado un sistema de gestión de datos propio (PhEDEx [13]) que realiza las operaciones con bloques de ficheros, es fiable y robusto, reintenta la transferencia en caso de fallo y busca siempre la mejor ruta posible. Este servicio se encarga, además, de registrar todos los datos obtenidos durante la producción en su base de datos propia y en los catálogos de CMS, haciéndolos públicos para toda la colaboración. El acoplamiento con PhEDEx ha sido una de las grandes mejoras introducidas en el sistema de producción de Monte Carlo.

⁵Los paquetes de software de CMS pueden acceder directamente a los datos guardados en ficheros ZIP sin necesidad de desempaquetarlos.

Se han mejorado considerablemente los procedimientos de escritura (lectura) de datos de salida (entrada) de los trabajos. Se hacen varias réplicas de los datos en sitios diferentes, de tal forma que alguna de ellas puede ser leída aunque alguno de los SEs esté temporalmente fuera de servicio. Por otro lado, todas las operaciones de escritura de los datos producidos se intentan varias veces en caso de fallo, con un cierto retardo entre intentos. De esta manera se evita que el trabajo quede invalidado si alguno de los SEs o alguno de los servicios de catálogos de CMS no está temporalmente operativo.

Inicialmente, cuando un trabajo fallaba, era difícil averiguar la causa de error, haciendo imprescindible la inspección visual de los enormes ficheros de salida producidos. Se ha conseguido crear un código de errores bastante amplio y preciso que facilita una rápida y correcta identificación de las causas de fallo, lo que permite reaccionar de forma más eficaz.

Por último, ahora es posible ejecutar trabajos en todos los nodos del Grid, aunque el software del experimento no haya sido previamente. Los trabajos, antes de comenzar su ejecución, descargan e instalan los paquetes de software necesarios, que han sido colocados previamente en algún SE. El tiempo adicional que introduce esta operación es relativamente corto en comparación con el tiempo total de ejecución del trabajo, pero permite el uso de gran cantidad de recursos, incluyendo aquellos que tradicionalmente dan poco o ningún soporte al experimento CMS.

3. Resultados

Una vez que todo el sistema de producción ha sido adaptado para trabajar en un entorno distribuido y heterogéneo como es el Grid, éste ha sido usado, desde hace un año y medio, para llevar a cabo una producción masiva de datos Monte Carlo. La eficiencia de la producción depende significativamente de la estabilidad y fiabilidad del Grid (conectividades, servicios centrales de bases de datos, etc.), y de la de todos los sitios donde se ejecutaban los procesos. A medida que se ganaba en experiencia se fueron descartados los sitios con mayor tasa de fallos, estableciéndose así una clara estrategia de listas blancas: sólo un número limitado de sitios, pero fiables, se usaron de forma masiva.

La figura 3 muestra el número de procesos ejecutados por día en el Grid durante un período de 500 días, y el número de sucesos simulados, digitalizados y reconstruidos en el mismo período. Se puede ver cómo el rendimiento era bajo en los comienzos, pero mejoró rápidamente gracias a todas las mejoras introducidas en el sistema de producción. Se consiguió entonces un ritmo medio de unos 110 trabajos en ejecución por día. Varias razones explican la falta de continuidad en el ritmo de producción, provocando la aparición de épocas de baja productividad: ausencia de peticiones de simulación de sucesos por parte de los grupos de física, demoras por el cambio en la versión del software del experimento y operaciones de mantenimiento en los servicios Grid. La tabla 2 muestra algunos datos relevantes alcanzados durante la producción.

	Simulación	Digitalización	Reconstrucción
Trabajos procesados	15000	14200	9000
Sucesos procesados	16 M	11.5 M	6.5 M
Sucesos procesados cada día	44500	37000	23500
Tiempo medio por trabajo	28 h	13 h	8 h
Tiempo medio por suceso	3 min	1.5 min	1 min
Tamaño medio por trabajo	360 MB	420 MB	250 MB
Tamaño medio por suceso	500 kB	570 kB	300 kB

Tabla 2: Valores aproximados de las cantidades más relevantes alcanzadas durante la producción MC en LCG

Se necesitarían aproximadamente 75 años para ejecutar en un único ordenador todos los procesos ejecutados en LCG, y se generaron en total unos 15 TB de datos. Estos números permiten hacernos una

idea aproximada de la potencia de cálculo que el Grid pone a disposición de sus usuarios, permitiendo conseguir unos resultados que serían impensables en granjas locales de PCs.

Hay que destacar que en la última etapa se alcanzó un valor cercano a los 1500 trabajos simultáneos en LCG, lo que se puede considerar, sin ningún tipo de dudas, como una gran éxito, dados los escasos recursos aún disponibles. En esta fase final de producción se logró completar con éxito la simulación de 2.4 millones de sucesos en menos de una semana. La digitalización y reconstrucción de esos sucesos fue llevada a cabo también en un plazo muy corto de tiempo. Éste ha sido, hasta la fecha, el mayor logro del experimento CMS haciendo uso de los recursos del Grid para la producción masiva de datos Monte Carlo.

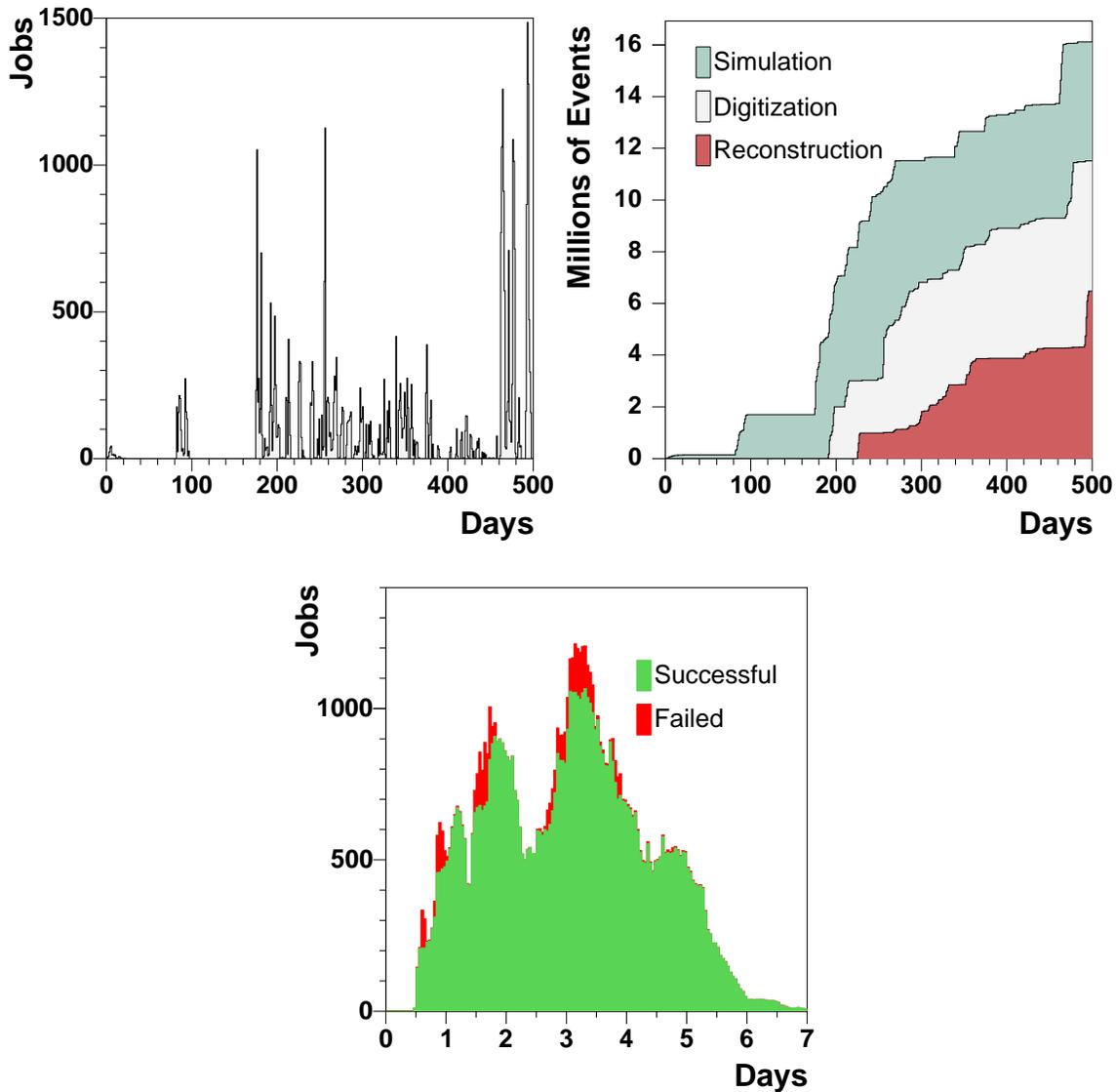


Figura 3: Número de trabajos ejecutados cada día (superior izquierda) y número de sucesos simulados, digitalizados y reconstruidos (superior derecha) durante un período de 500 días. Simulación de 2.4 millones de sucesos en una semana durante la fase final de la producción (inferior).

En la figura 4 se muestra la distribución de laboratorios donde se ejecutaron los procesos. Podemos ver que, como se ha comentado previamente, se ha seguido una estrategia clara basada en la idea de usar pocos sitios, pero muy fiables y robustos. El dato más destacable es que un porcentaje bastante elevado de los procesos fueron ejecutados en los dos centros españoles (CIEMAT y PIC). El tener acceso a los recursos de ambos centros (bien directamente o a través de los administradores locales), los convertía en los candidatos ideales para la ejecución de la producción masiva. En general, a parte de la cantidad de recursos que aportaba y su estabilidad, uno de los factores clave para decidir si se usaba o no un nodo Grid era la buena predisposición para colaborar y la rapidez de reacción por parte de los administrados locales del nodo. Éste es el caso de los centros alemanes y británicos, principalmente, cuyo personal se mostró dispuesto a colaborar en todo momento. El número de centros que pueden usarse es aún menor en el caso de la digitalización, pues sólo puede ejecutarse en aquellos nodos donde las muestras de pile-up han sido previamente instaladas. Debe disponer además de un sistema potente de acceso local a datos que permita la lectura simultánea de estas muestras por parte de decenas de trabajos de forma eficiente. Pocos han sido, hasta ahora, los sitios capaces de cumplir con estos requisitos. 42 laboratorios repartidos en 14 países contribuyeron a la producción, aunque casi el 90 % se realizó en sólo 13 laboratorios de 5 países diferentes.

Gracias a las herramientas de monitorización integradas en el sistema de producción, y al completo y preciso código de errores implementado, se pudo hacer un estudio detallado de las causas de fallo de los trabajos. La figura 5 muestra, diferenciando por etapas, el número de intentos necesarios para conseguir que cada trabajo finalizase con éxito, lo que se puede expresar en términos de eficiencia. Durante la fase de implementación el sistema aún no era lo bastante robusto lo que, junto con el hecho de que el sistema de catálogos que usaba CMS no era aún lo bastante fiable, introdujo una gran cantidad de fallos. En la segunda etapa, tras las mejoras añadidas, el sistema mejoró sustancialmente. Se ve claramente cómo se redujo, de forma muy significativa, el número de intentos por trabajo, lo que se traduce en un aumento considerable de la eficiencia. En todos los pasos (simulación, digitalización y reconstrucción) la eficiencia aumentó significativamente, pasando de un valor global del 66 % durante la fase de implementación al 86 % en la etapa final. En la tabla 3 se compilan los porcentajes de trabajos fallidos durante las dos etapas, así como los valores globales. En general, la frecuencia de ocurrencia de errores en casi todos los capítulos listados en la tabla disminuyó a medida que las mejoras se iban introduciendo en el sistema de producción, especialmente los relacionados con el manejo de datos (lectura y escritura, tanto remota como localmente).

Causa de Fallo	Fase 1	Fase 2	Global
Lectura de los datos de entrada	4.8 %	0.5 %	2.3 %
Escritura de los datos de salida	7.4 %	0.3 %	3.3 %
Acceso al catálogo de LCG	2.8 %	1.5 %	2.0 %
Configuración del software del experimento	10.1 %	0.2 %	4.3 %
Acceso a los datos locales	8.3 %	2.1 %	4.7 %
Fallos en el programa de producción MC	<0.1 %	5.5 %	3.2 %
Errores en la configuración del sitio Grid	0.3 %	0.4 %	0.4 %
Sin clasificar	0.3 %	3.5 %	2.2 %

Tabla 3: Evolución de los porcentajes de fallo durante las dos etapas de la producción. Durante la etapa de implementación el porcentaje total de fallos fue del 34 %. Tras las mejoras éste valor se redujo al 14 %.

4. Experiencia

La experiencia ha sido, en términos generales, bastante satisfactoria. Tras una primera etapa llena de dificultades debido a lo novedoso de la nueva metodología de trabajo y de los nuevos servicios y recursos

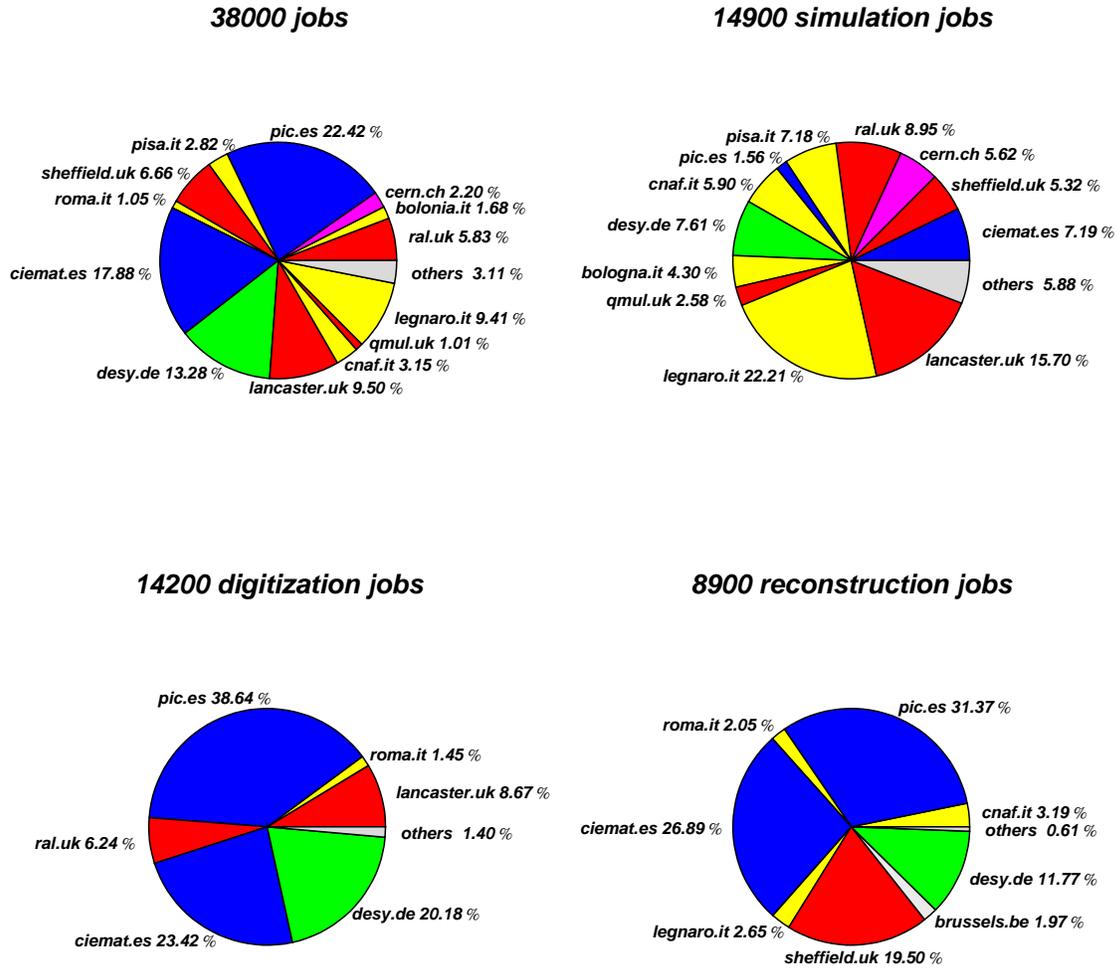


Figura 4: Distribución por sitios de los trabajos ejecutados: total (superior izquierda), simulación (superior derecha), digitalización (inferior izquierda), reconstrucción (inferior derecha).

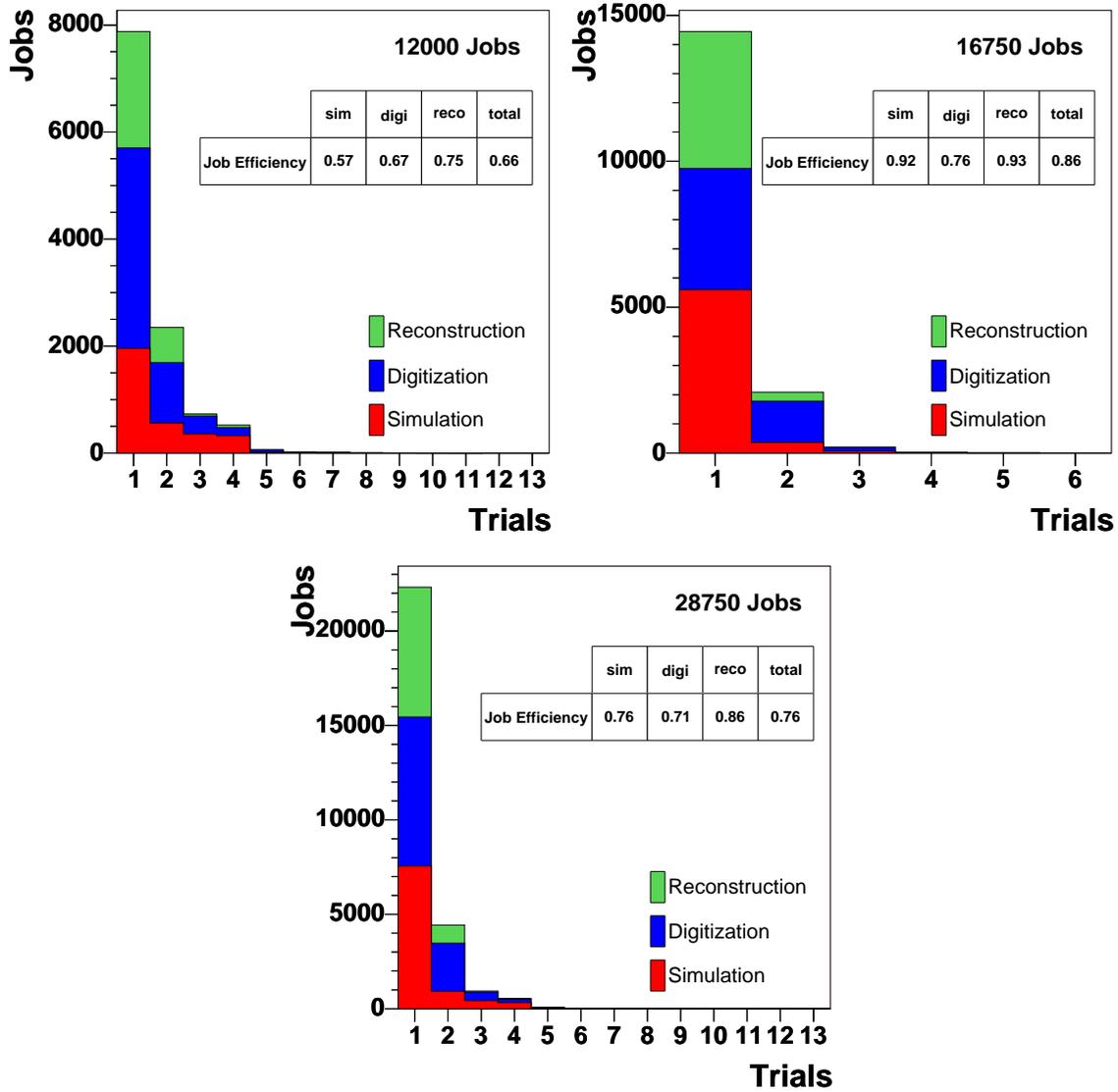


Figura 5: Número de intentos para ejecutar satisfactoriamente cada trabajo, en ambas fases de la producción (superior) y en total (inferior).

de los que hay que hacer uso, el sistema de producción mejoró considerablemente, haciéndose cada vez más robusto y fiable.

Sin embargo, aún quedan aspectos que se pueden mejorar. El sistema aún carece de una automatización que, analizando el origen de los fallos, decida si es conveniente intentar de nuevo o no, y dónde, la ejecución de los procesos que han fallado. Este sistema automático también debería ser capaz de adaptar dinámicamente la lista de sitios admitidos y excluidos en función de su rendimiento. Todas estas tareas siguen necesitando de una constante vigilancia e intervención por parte del operador. Por otra parte, el sistema debería ser capaz de mantener un cierto número de trabajos en ejecución constante, para así poder hacer un uso más eficaz de todos los recursos disponibles; y carece aún de un nivel de automatismo suficiente que permita una gestión automática de todos los pasos de la producción y una distribución de los datos a los sitios donde se llevará a cabo el análisis de los mismos. El Grid, en general, sigue siendo un entorno de trabajo en el que es necesaria la constante vigilancia por parte de los operadores.

Todas estas mejoras están siendo introducidas en el nuevo sistema de producción de Monte Carlo que se está desarrollando para CMS, y que ya incorpora todas las mejoras implementadas en el anterior sistema. Toda la experiencia adquirida durante la migración y uso del anterior sistema en el Grid es de gran valor para el desarrollo del nuevo sistema.

5. Conclusiones

Se ha realizado una implementación completa del sistema de producción Monte Carlo de CMS en LCG, desde la generación de sucesos hasta la publicación de los datos para su análisis, pasando por todos los pasos intermedios. La introducción de algunas operaciones atómicas (como la creación de los metadatos) y el acoplamiento con el sistema de transferencia de datos de CMS han sido las claves del éxito. Muchas operaciones se han hecho más robustas, mejorando significativamente la eficiencia. Además, se han introducido algunos conceptos novedosos que han permitido que la ejecución de los procesos sea independiente del entorno (pre-instalaciones del software o de las muestras de pile-up).

Se ha hecho uso de la herramienta de producción McRunjob para producir varios millones de sucesos en LCG, para los más diversos canales físicos. 16 millones de sucesos han sido simulados, 11.5 millones han sido digitalizados y 6.5 millones reconstruidos. Estos resultados se han conseguido gracias a una estrategia de listas blancas, ejecutando la producción de forma masiva sólo en los nodos que ofrecían un buen rendimiento de forma constante.

Ha sido la primera vez que la digitalización y la reconstrucción para CMS se ha podido hacer en LCG. La tarea de operar la producción de Monte Carlo en Grid es de gran responsabilidad en la colaboración CMS (integrada por unos 2000 miembros). Por tanto, el éxito conseguido es de gran relevancia para el experimento CMS. Los datos producidos han sido la base para los estudios de física incluidos en los volúmenes I y II del TDR [14], documentos clave del potencial de física de CMS. Estos resultados han sido presentados en uno de los congresos de Computación para física de altas energías más importantes (“International Conference on Computing in High Energy Physics 2006”, celebrado en Bombai, India) [15] y serán publicados próximamente.

Todos estos conceptos novedosos, junto con todas las mejoras introducidas, serán incorporadas al futuro sistema de producción, consolidando el trabajo realizado en los últimos dos años y sirviendo como semilla para las futuras mejoras de la producción en LCG.

Referencias

- [1] The Large Hadron Collider, <http://cern.ch/lhc-new-homepage/>.
- [2] Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, <http://www.cern.ch>,
- [3] ATLAS Collaboration, <http://atlas.web.cern.ch/Atlas/index.html>.
- [4] CMS Collaboration, *CMS Technical Proposal*, CERN/LHCC/94-38(1994).
- [5] LHCb Collaboration, <http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/>,
- [6] ALICE Collaboration, <http://aliceinfo.cern.ch>,
- [7] Ian Foster, Carl Kesselman, Steven Tuecke. “The Anatomy of the Grid. Enabling Scalable Virtual Organizations”.
- [8] LHC Computing Grid, <http://cern.ch/lcg/>.
- [9] C.Grandi, D.Stickland, L.Taylor. “The CMS Computing Model” CERN-LHCC-2004-035/G-083
- [10] Runjob Project, <http://projects.fnal.gov/runjob/>.
- [11] C.Grandi, A. Renzi. “Object Based System for Batch Jobs submission and Monitoring”. CMS NOTE-2003/005. http://cmsdoc.cern.ch/documents/03/note03_005.pdf
C. Grandi et al. “Evolution of BOSS, a tool for job submission and tracking”. Proceedings of the International Conference of Computing in High Energy and Nuclear Physics, Febrero 2006, Mumbai, India.
- [12] Monitoring Agents Using a Large Integrated Service Architecture, <http://monalisa.cern.ch/monalisa.html/>
I. Legrand et al., “MonALISA : A Distributed Service for Monitoring, Control and Global Optimization”. Proceedings of the International Conference of Computing in High Energy and Nuclear Physics, Febrero 2006, Mumbai, India.
- [13] Physics Experiment Data Export, <http://cern.ch/cms-project-phedex/>.
L. Tuura et al., “PhEDEx high-throughput data transfer management system”. Proceedings of the International Conference of Computing in High Energy and Nuclear Physics, Febrero 2006, Mumbai, India.
- [14] CMS software and detector performance: Technical Design Report, Volume I, CERN-LHCC-2006-001.
CMS physics performance: Technical Design Report, Volume II, CERN-LHCC-2006-021.
- [15] J. Caballero, P. Garcia-Abia, J.M. Hernandez, “CMS Monte Carlo Production in the LHC Computing Grid”. Proceedings of the International Conference of Computing in High Energy and Nuclear Physics, Febrero 2006, Mumbai, India.