

AVANCES EN DESARROLLO DE SISTEMAS DE CONTROL DISTRIBUIDO PARA MEDICIONES ALTA PRECISIÓN EN EXPERIMENTOS DE FÍSICA

Juan Carlos Cabanillas Noris¹, Juan Manuel Mejía Camacho²,
Ildefonso León Monzón³

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Recibido: 22/09/2024 Aceptado: 13/11/2024

<https://doi.org/10.69823/avacient.v4n2a9>

Resumen.- Este artículo se enfoca en el análisis de las actualizaciones de uno de los sistemas más importantes para la operación de los experimentos de física de altas energías denominado sistema de control de detectores, que es el encargado de monitorear, controlar y configurar los parámetros operativos del detector y sus subsistemas. El adecuado diseño de este sistema de control permite una mejor calidad de los datos físicos adquiridos por el detector en un experimento, con la premisa de tenerlo siempre en óptimas condiciones de operación durante su vida útil. Primeramente, en ese documento se hace una revisión de los conceptos básicos de estos experimentos, así como de los elementos actuales y futuros más importantes de estos sistemas de control. Posteriormente, se revisa la propuesta de una metodología para modelar y estandarizar su desarrollo, a pesar de los factores adversos en ese sentido. Finalmente, se analizan las áreas de oportunidad encontradas en las técnicas de Inteligencia Artificial para que pudieran ser incorporadas en diversos ámbitos operativos y predictivos del sistema de control.

Palabras Clave: Altas energías, DCS, detectores, experimentos, partículas.

ADVANCES IN THE DEVELOPMENT OF DISTRIBUTED CONTROL SYSTEMS FOR HIGH PRECISION MEASUREMENTS IN PHYSICS EXPERIMENTS

Abstract.- This article focuses on updates analysis of one of the most important systems in the operation of high energy physics experiments named detector control system, which is responsible for monitoring, controlling and configuring the operating parameters of the detector and its subsystems. Furthermore, the proper design of this control system allows for a better quality of the physical data acquired by the detector in an experiment, always seeking to keep it in optimal conditions during its useful life. First, this document reviews the basic concepts of these experiments, as well as the most important current and future elements of these control systems. Then, the proposal of a methodology to model and standardize their development despite the adverse factors in this regard is reviewed. Finally, the areas of opportunity found in Artificial Intelligence techniques were analyzed so that they could be incorporated into various operational and predictive areas of the control system.

Keywords: High energies, DCS, detectors, experiments, particles.

Introducción

Las mediciones cada vez más precisas de los parámetros requeridos en los detectores de partículas en experimentos de Física de Altas Energías (HEP), demandan almacenar un extenso muestreo de eventos durante las colisiones de los aceleradores. Por lo tanto, es necesario hacer actualizaciones significativas a los sistemas y equipos actuales para procesar los datos en tiempo real, debido a la gran cantidad de información que generan dichos detectores y sus subsistemas. A partir de lo anterior, uno de los objetivos de este documento consiste en presentar una sistematización estandarizada para facilitar el desarrollo del Sistema de Control de los Detectores (DCS) de partículas de altas energías integrados en estos experimentos de física. Para ello, se propone utilizar la metodología de Proceso Unificado Racional (RUP) para obtener la conceptualización de los casos de uso y sus diagramas de Lenguaje Unificado de Modelado (UML).

¹ Doctor asignado al posgrado del Tecnológico Nacional de México/ IT Culiacán <https://orcid.org/0000-0002-2253-165X>. CVU CONAHCYT: 42222. juan.cn@culiacan.tecnm.mx (**Autor correspondiente**).

² Doctor de la Facultad de Ingeniería Unidad Culiacán de la Universidad Autónoma de Sinaloa <https://orcid.org/0000-0001-5945-3424>. CVU CONAHCYT: 104503. juan.mejia@uas.edu.mx

³ Doctor de la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la Universidad Autónoma de Sinaloa <https://orcid.org/0000-0002-7919-2150>. CVU CONAHCYT: 122746. ildefonso.leon.monzon@uas.edu.mx

El otro objetivo consiste en analizar la integración de la inteligencia artificial en áreas poco exploradas desde este punto de vista, como son la recuperación de errores y operación óptima del DCS sin o poca intervención de un operador humano. De acuerdo con lo previamente señalado, se espera que los tiempos de desarrollo de los nuevos sistemas de control sean cada vez más reducidos, así como ofrecer a los programadores un panorama más amplio de la mayoría de los procesos, actores y lineamientos involucrados en el diseño, desarrollo y puesta en marcha de estos sistemas. Finalmente, se busca que las técnicas aplicadas de inteligencia Artificial tengan un impacto en una mayor eficiencia, calidad de los datos y estabilidad tanto operativa como predictiva del detector.

Materiales y métodos.

Experimentos de física de alta energía

Los HEPs están constituidos por detectores que cuentan con dispositivos de rastreo, calorímetros y detectores de identificación de partículas. Los detectores recopilan pistas sobre partículas generadas durante colisiones, como; velocidad, momento, masa y carga, con las que se puede determinar la identidad de una partícula. El proceso requiere de aceleradores, potentes electroimanes y complejos subdetectores. Todo esto para descubrir de qué está hecho el universo y cómo funciona. Los bunches de partículas son producidos en los aceleradores para colisionarse a velocidades cercanas a la de la luz, y normalmente viajan en línea recta, aunque en presencia de un campo magnético sus caminos se vuelven curvos. Los electroimanes colocados alrededor de los detectores de partículas generan campos magnéticos para explotar este efecto. Los físicos pueden calcular el momento de una partícula (una pista de su identidad), a partir de la curvatura de su trayectoria. Las partículas con alto momento viajan en líneas casi rectas, mientras que aquellas con un momento muy bajo se mueven hacia adelante en espirales muy cerradas dentro del detector.

Dichos experimentos están conformados de los siguientes dispositivos (CERN, 2024):

1. Los aparatos de rastreo miden la flexión de las partículas cargadas eléctricamente y revelan las rutas que siguen a medida que pasan e interactúan con ciertas sustancias. Para ello se hace uso de un programa de computadora para reconstruir los patrones grabados de las pistas.

2. Los calorímetros miden la energía que pierde una partícula a medida que atraviesa este detector. Están diseñados para absorber o detener la totalidad de la energía de las partículas provenientes de una colisión; esta energía es depositada dentro del detector y esta transferencia se puede identificar como una luz, señal eléctrica, etc. Por un lado, los calorímetros electromagnéticos miden la cantidad de energía de los electrones y fotones a medida que interactúan con las partículas cargadas eléctricamente del material. En su defecto, los calorímetros hadrónicos toman muestras de la energía de los hadrones (que son partículas compuestas por quarks, como lo son los protones y neutrones) a medida que interactúan con los núcleos atómicos. Los calorímetros pueden detener la mayoría de las partículas conocidas, con excepción de los muones y neutrinos.

3. Los detectores de identificación de partículas utilizan la estimación de la velocidad con que viaja una partícula. Con la velocidad de la partícula y su momento, es posible estimar su masa. Existen dos métodos más para definir la identidad de una partícula y ambos funcionan detectando la radiación emitida por las partículas cargadas. La primera de ellas estima la velocidad calculando el tiempo que tarda una partícula en recorrer una determinada distancia; para ello se usan sistemas de tiempo de vuelo. El segundo método aprovecha el hecho de que una partícula cargada puede viajar más rápido que la luz a través de un medio dado emite radiación de Cherenkov en un ángulo que depende de su velocidad (Observatorio Pierre Auger, 2024). A partir del conocimiento de este ángulo, es posible calcular la velocidad de la partícula, que la combinarse con la medición del momento de la partícula se puede determinar su masa, así como su identidad. Finalmente, los físicos recopilan todas estas pistas de diferentes partes del detector y construyen una idea de la partícula que había en el detector en el instante de la colisión. El siguiente paso es buscar en las colisiones partículas inusuales o resultados que no se ajustan a las teorías actuales.

Sistema de Control del Detector

Algunos experimentos HEP han estado procesando datos de colisiones durante varios años, como se puede apreciar en Aamodt et al. (2008) y Synchrotron ALBA (2024). Uno de los sistemas de software más críticos en los experimentos HEP es el Sistema de Control de los Detectores (DCS) de partículas, que generalmente es un Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA) distribuido. También el DCS facilita las comunicaciones y brinda retroalimentación a los diferentes servicios y sistemas internos y externos al experimento, tales como: acelerador, sistemas de enfriamiento, electricidad, magnetos, seguridad, control de acceso, entre otros (Mercado, 2008; Esperante, 2010; Pitz, 2012; Cabanillas-Noris, 2017; Mejía-Camacho et al., 2023). La tarea principal del sistema de control es garantizar el funcionamiento correcto y seguro de los detectores instalados en un experimento de física de altas energías. El DCS controla, verifica y configura el equipo y subsistemas que conforman el detector; entre los cuales

destacan los dispositivos de hardware comerciales, como: fuentes de alimentación y tarjetas de voltaje; así como equipos personalizados de la Electrónica de Frontera Final (FEE). Estas acciones se realizan principalmente mediante el envío de comandos y la lectura del estado del equipo desde un solo lugar de trabajo (ALICE DCS, 2007). El software del DCS debe integrar equipos comerciales, a través del protocolo de Comunicación de Plataforma Abierta (OPC); así como equipos personalizados, como por ejemplo, la Electrónica de Lectura (ROE). Para este último, se utiliza un protocolo administrador de información y cierta tecnología de servidores. También se recomienda aplicar marcos de trabajo estandarizados que faciliten el desarrollo de aplicaciones de software homogéneas para todos los detectores durante la integración y actualización del sistema de control dentro del experimento. Finalmente, el DCS proporciona a los expertos y operadores del experimento HEP una Interfaz Gráfica de Usuario (UI) para interactuar con los detectores y el equipo asociado. Las interfaces implementadas en el experimento son intuitivas y fáciles de usar para facilitar su funcionamiento (ALICE DCS, 2007), y solo los usuarios autorizados pueden tener acceso a dicha interfaz y hacer uso del sistema, mediante la asignación de roles y privilegios.

DCS de Experimentos HEP actuales

A. Arquitectura de hardware del DCS

Actualmente, los sistemas de control de detectores (DCS) han estado utilizando una arquitectura de cinco niveles (Chochula et al., 2017), como se muestra en la Figura 1.

1.- Capa de Hardware: proporciona todos los dispositivos y sensores necesarios para la operación del experimento. Principalmente fuentes de alimentación, Controladores Lógicos Programables (PLCs), módulos de la FEE del detector y dispositivos conectados por buses de campo industriales.

2.- Capa de Abstracción del Hardware: proporciona la unificación de la comunicación entre una gran variedad de dispositivos y el software del sistema de control.

3.- Capa de Control del DCS: procesa los datos adquiridos de los dispositivos. Una granja de servidores ejecuta un sistema SCADA distribuido, configurado para funcionar también como un sistema alcanzable remotamente. Cada valor recibido de los parámetros seleccionados se compara con los límites operativos, y de ser necesario, se toman medidas correctivas o, a su vez, el operador revisa el problema. Dicha capa de control configura los dispositivos de control y les envía comandos. Los datos de configuración y los datos adquiridos por el DCS se guardan en bases de datos.

4.- Capa de Operación: la operación del experimento debe seguir una secuencia de pasos cuidadosamente organizada. Por ejemplo, un módulo del detector no se puede encender, a menos que se proporcione suficiente enfriamiento, los módulos electrónicos específicos solo se pueden alimentar después de que se haya aplicado el alto voltaje a los sensores, etc. Dicha lógica se implementa en la Capa de Operación. Esta capa representa a todos los dispositivos y sus canales, como una Máquina de Estados Finitos (FSM) integrada en una jerarquía global basada en un paquete de manejo de estados y acciones (Franek y Gaspar, 2004). Este enfoque permite al operador enviar un comando global; por ejemplo, la capa de operación sincroniza todas las acciones entre los detectores y sus componentes para preparar el experimento para la adquisición de datos.

5.- Capa de Interfaz de Usuario: visualiza todos los componentes y estados del DCS de una manera fácil de usar, permitiendo la operación del experimento desde un lugar de trabajo por un solo operador.

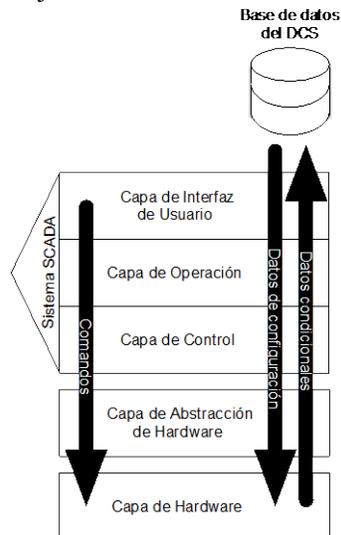
B. Flujo de datos del DCS

Los dispositivos controlados por el DCS se configuran según los requisitos operativos asociados con el modo del haz y el tipo de física estudiada por el experimento HEP. Por ejemplo, la operación con protones requiere diferentes configuraciones de sus dispositivos y equipos con respecto al modo de iones. Los detectores generalmente toman datos de calibración y requieren ser reconfigurados nuevamente cuando hay períodos sin presencia de haz (Chochula et al., 2017).

Cada modo de operación requiere datos de configuración que se leen de la base de datos del DCS y se programan a todos los dispositivos y equipos que la requieran, mediante el sistema SCADA (ver Figura 1). Los registros de configuración optimizados, previamente guardados, se compilan y personalizan en un formato admitido por el hardware. En el dominio de la electrónica (FEE), los datos son repetitivos y la base de datos (DB) almacena un registro de configuración común a un grupo de módulos, en lugar de un conjunto de registros individuales idénticos. Por otro lado, los datos condicionales adquiridos de los subsistemas y canales se supervisan, regulan y se almacenan en la base de datos del DCS. Del mismo modo, la dirección del flujo de datos condicionales es contraria al flujo de datos de configuración. Estos datos de condiciones se almacenan de manera continua independientemente del modo de operación del experimento, y se utilizan principalmente para fines de referencia o calibración cuando hay períodos sin haz. Cuando los haces se aceleran y se producen colisiones, uno de los objetivos más importantes del sistema de control

es garantizar que adquisición de datos sea estable y de la mejor calidad. Por otro lado, el Sistema de Adquisición de Datos (DAQ) procesa las señales de los detectores habilitados por las partículas detectadas. El flujo de datos del DAQ se almacena en una infraestructura independiente que es autónoma del DCS. Los datos de DAQ deben concatenarse con la información del DCS almacenada en la base de datos de dicho DCS para fines de análisis final. Una corrida se define como un período de adquisición de datos estable. Los datos almacenados durante una corrida se envían a otros niveles de análisis, utilizando una infraestructura de computadoras. La señal de los detectores se une a las pistas de partículas, y se calculan las propiedades de las partículas (tipo, momento y trayectoria). Esta reconstrucción también depende de los parámetros del DCS, más conocidos como datos condicionales.

Figura 1. Capas y flujo de datos del Sistema de Control del Detector.



Nota. Elaboración propia con información tomada de Chochula et al., (2017).

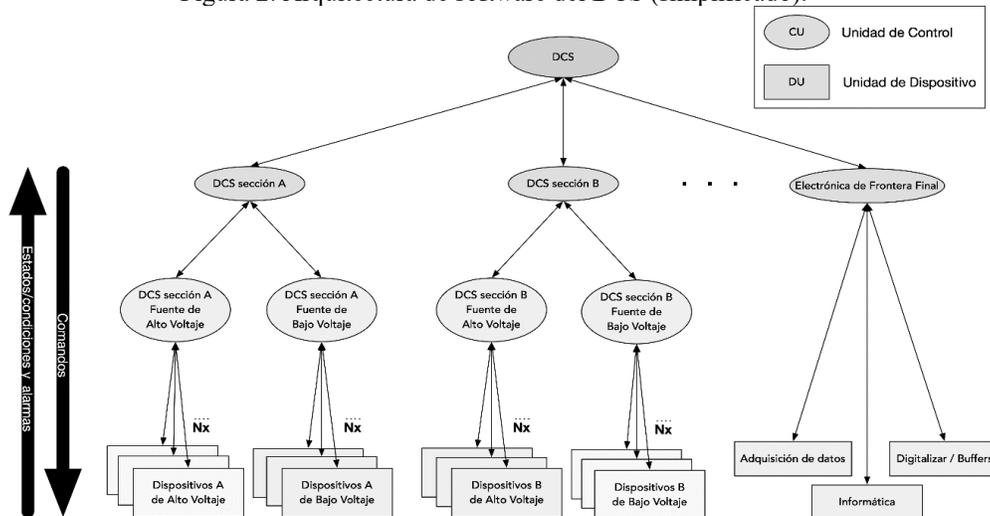
Arquitectura de software del DCS

La arquitectura del software DCS puede ser una estructura jerárquica en forma de árbol que representa la operación de los subsistemas y dispositivos de hardware. La estructura de árbol está hecha de nodos, cada uno con un sólo padre, excepto el nodo superior. Los nodos pueden tener cero, uno o más hijos. Un nodo sin hijos se llama hoja y un subconjunto de nodos del árbol se le llama sub-árbol (Mercado, 2008; Lucas, 2009). Hay dos tipos de nodos que sirven como bloques de construcción básicos: Unidad de Control (CU) y Unidad de Dispositivo (DU). Un DU maneja un dispositivo y es un nodo tipo hoja y modela un dispositivo.

Las CU modelan y controlan los subárboles debajo de ellas. La jerarquía puede tener un número arbitrario de niveles para proveer a los subsistemas, con tantas capas de abstracción como sea necesario. La Figura 2 muestra la arquitectura de software jerárquica simplificada de un sistema de control del detector. También puede haber otros tipos de subsistemas como: refrigeración, gas, entre otros.

El comportamiento y la funcionalidad de cada nodo en la jerarquía de árbol se modelan e implementan como una máquina de estados finitos. FSM es un concepto crucial en la arquitectura de software del DCS, y proporciona una toma de decisiones descentralizada y distribuida; y las acciones se pueden realizar de forma autónoma, aun cuando se controlan centralmente desde el DCS del experimento. Esto conduce naturalmente al paralelismo en operaciones automatizadas como la recuperación de errores y, en consecuencia, aumenta la efectividad del sistema (Chochula et al., 2013).

Figura 2. Arquitectura de software del DCS (simplificada).



Nota. Elaboración propia con información tomada de Mercado (2008), Cabanillas-Noris (2017) y Mejía-Camacho (2023).

C. Sistema de Alto Voltaje y Bajo Voltaje

Los sistemas de suministro de energía son el núcleo de cualquier experimento HEP. Estos proporcionan el Alto Voltaje (HV) y el Bajo Voltaje (LV) requeridos por los detectores y los componentes asociados de la Electrónica de Frontera Final. La calidad de la fuente de alimentación es crucial para obtener el mejor rendimiento de la configuración. La sensibilidad de los detectores modernos los hace susceptibles a cualquier variación, incluso a pequeñas variaciones en la fuente de alimentación. Por lo tanto, características como poco ruido, baja ondulación y alta estabilidad se vuelven esenciales en el diseño de un sistema de suministro de energía. Algunas tarjetas de bajo voltaje están diseñadas para proporcionar voltajes máximos de 4.5 a 15 V con 1mV de resolución. Por otro lado, hay tarjetas de alto voltaje que proporcionan hasta 3.5 kV y corriente de hasta 3.5 mA (CAEN, 2019).

D. Electrónica de Frontera Final (FEE)

La FEE lleva a cabo dos tareas principales. Primero, adquiere, digitaliza y almacena los datos del detector de un número sustancial de canales analógicos; segundo, procesa los datos locales de rastreo en línea (online). Las tareas específicas pueden ser: amplificación, conformación de pulsos de salida, discriminación de señales y mediciones de tiempo y carga, entre otros (Mejía-Camacho et al., 2023).

DCS para nuevos Experimento HEP de alta precisión

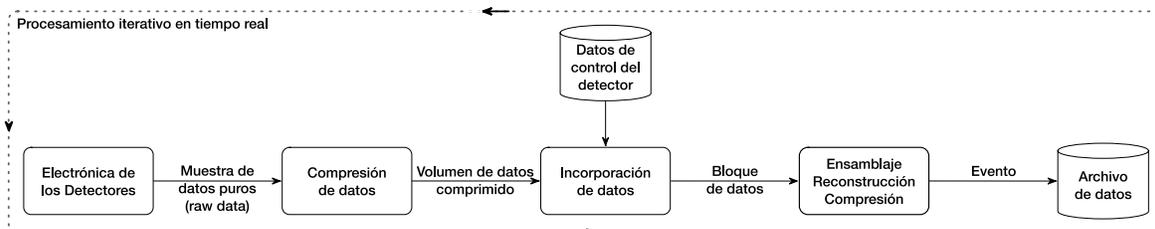
Las mediciones de alta precisión de los detectores de experimentos HEP requieren almacenar un extenso muestreo de eventos durante las colisiones. En consecuencia, el sistema informático debe ser rediseñado para cumplir con el desafío de tomar muestras del evento a una velocidad mucho mayor. Debido a estas altas tasas de interacción, no es posible almacenar los datos del detector en el disco y ejecutar el procesamiento de datos una vez que finaliza la corrida. Los datos del detector deben procesarse instantáneamente en tiempo real. La reconstrucción de eventos será necesaria para una reducción significativa de los volúmenes de datos antes de enviarlos para su análisis. Los datos condicionales del DCS deben proporcionarse junto con los datos del detector para realizar dicho análisis. El manejo de los datos condicionales y el acceso de la FEE representan la necesidad del desarrollo de un nuevo DCS para un experimento HEP de procesamiento de datos en tiempo real (Ananya et al., 2014).

a. Flujo de datos

Será necesario reducir el volumen masivo de datos resultante de la combinación de la alta tasa de interacción y el gran tamaño del evento generado durante una corrida. En consecuencia, los datos puros adquiridos continuamente de los detectores durante dicha corrida (datos físicos) se comprimirán en primer lugar. Luego, se agregan los datos de control del detector (datos de condición y configuración), generando así un bloque de datos transferidos a las siguientes etapas para crear un evento completo mediante el ensamblaje, la reconstrucción y la realización de una compresión de datos final, así como el almacenamiento de datos también (Chochula et al., 2013). El procesamiento de datos mencionado anteriormente se realizará en tiempo real de forma iterativa y sincrónica con la toma de datos para lograr los siguientes

dos objetivos principales: reducir el volumen de datos y limitar las necesidades computacionales generales al realizar parte de la reconstrucción antes de almacenar los datos. Las descripciones del flujo de datos también se pueden apreciar en la Figura 3.

Figura 3. Diagrama de bloques del flujo de datos del detector y el procesamiento de datos en tiempo real.



Nota: Elaboración propia con información tomada de Sommerville (2011), Kimmel (2005) y Fontela (2012).

b. Desarrollo del DCS

Para el desarrollo del software de control de un detector en un experimento HEP de alta precisión, se requiere conocer los cambios de hardware y flujo de datos. También se necesita un conocimiento preciso de los requisitos de la nueva estructura de procesamiento en tiempo real. Todo este proceso de integración del software de control con los elementos de hardware del detector y sus subsistemas comprende las etapas de: a) diseño, b) simulación, c) construcción, d) puesta en marcha, y e) operación del detector en el experimento HEP. Asimismo, existe otro número de detectores y subdetectores independientes adicionales que deben controlarse individualmente mediante su DCS correspondiente y que son integrados también a un DCS central experimental.

Sin embargo, existen diferencias conceptuales y estructurales significativas entre los detectores de altas energías, tales como: tipos de eventos a analizar (colisiones de diferentes tipos partículas, rayos cósmicos, corridas especiales como los escaneos VdM), dimensiones estructurales, tipo de material (dispositivos semiconductores, centelladores de plástico, cámaras de gas, etc.), parámetros a monitorear (temperatura, niveles de radiación, campo magnético, carga, tiempo, etc.), tipo de actuadores a controlar (refrigeración, canales de alto y bajo voltaje, sistema de gas, etc.), infraestructura, número de canales de lectura, entre otras. Esta diversidad y características de los detectores siempre deben considerarse durante la determinación y especificación de los requisitos para el desarrollo, puesta en marcha y funcionamiento del software del DCS para este tipo de experimentos (Acharya et al., 2024; ALICE Collaboration, 2022; Bordalo, 2012; Bortolin, 2011; Tomásio, 2010; Xi-Hui et al., 2008).

Resultados

Casos de uso de los usuarios del DCS

A pesar de las diferencias estructurales, complejidad y operativas, existen muchos aspectos comunes, tales como: lineamientos y normas de diseño por parte del personal especializado del experimento y acelerador, tipo de software distribuido y su versión vigente, frameworks de diseño, alarmas, arquitecturas de software y hardware, y modelado con FSMs de los nodos; que deben ser cumplidas por todos los desarrolladores para integrar sus sistemas DCS de cada detector al sistema central de control del experimento. Con base en lo anterior, consideramos que se requiere de una metodología de diseño del software para facilitar y estandarizar el proceso de desarrollo del DCS. Primero, hay que establecer los requisitos funcionales y Casos de Uso (UC) del sistema desde el punto de vista de los principales actores y después definir los casos de uso derivados.

Inicialmente, los requisitos funcionales conducen a la definición de qué acciones debe ejecutar el sistema. Dichos requisitos se describen en forma de declaraciones que apuntan a los servicios que el sistema debe proporcionar y cómo debe comportarse en función de entradas o eventos específicos. También pueden explicar lo que el sistema no debe hacer (Cabanillas-Noris et al., 2016; Sommerville, 2011).

De igual forma, un caso de uso muestra un escenario general que define lo que un usuario en particular requiere del sistema. El modelado de cada caso de uso debe incorporar preferiblemente un diagrama y una descripción tabular del mismo. En este trabajo, la definición de los casos de uso del sistema de control se presenta en función de los tres actores principales (Fukunaga, 2002; Cabanillas-Noris et al., 2019; Mejía-Camacho et al., 2023), que son: Experto en el Detector (ED), Experto en el DCS Central (EDCSC) y Operador en el DCS Central (OCDSC), donde de manera general un actor puede ser una persona o un subsistema (software, módulos, navegador web, etc.).

1.- Casos de uso del Experto en el Detector (ED):

- a) Interacción software-usuario mediante el uso de interfaces gráficas.
- b) Configurar alarmas en parámetros relevantes.
- c) Definir las instrucciones de ayuda de las alarmas.
- d) Graficar el comportamiento de parámetros importantes relacionados con la calidad de los datos y estabilidad del detector.
- e) Modelar el comportamiento de los nodos (lógicos y físicos) de la arquitectura de software (FSMs).
- f) Diseñar sistema de enlace del software con los parámetros de la electrónica (FEE).
- g) Integrar el sistema de control del detector con el DCS central del experimento.
- h) Configurar de los parámetros de flujo que determinan las condiciones de operación.
- i) Configurar las restricciones de acceso al nodo del sistema basado en roles y privilegios.
- j) Operar y monitorear el sistema de energía.
- k) Configurar los parámetros de entrada conforme al tipo de corridas y/o condiciones especiales del acelerador o experimento.

2.- Casos de uso del Experto en el DCS Central del Experimento (ECDCS):

- a) Utilizar software y herramientas de diseño actualizadas.
- b) Operar adecuadamente en condiciones especiales del experimento u acelerador.
- c) Verificar el flujo y almacenamiento de los datos condicionales del DCS.
- d) Evaluar operativamente las interfaces gráficas de usuario (GUI) y FSMs.
- e) Revisar el enlace DCS-FEE.

3.- Casos de uso del Operador en el DCS Central (OCDCS):

- a) Monitorear adecuadamente las interfaces de usuario y de parámetros relevantes del detector.
- b) Operar el comportamiento de los nodos del DCS a través de FSMs.
- c) Atender alarmas e instrucciones de ayuda para detectores / subsistemas.
- d) Operar el estado del detector para condiciones especiales del acelerador y experimento (seguridad, inyección de haz, caída de haz, etc.).

Metodología RUP

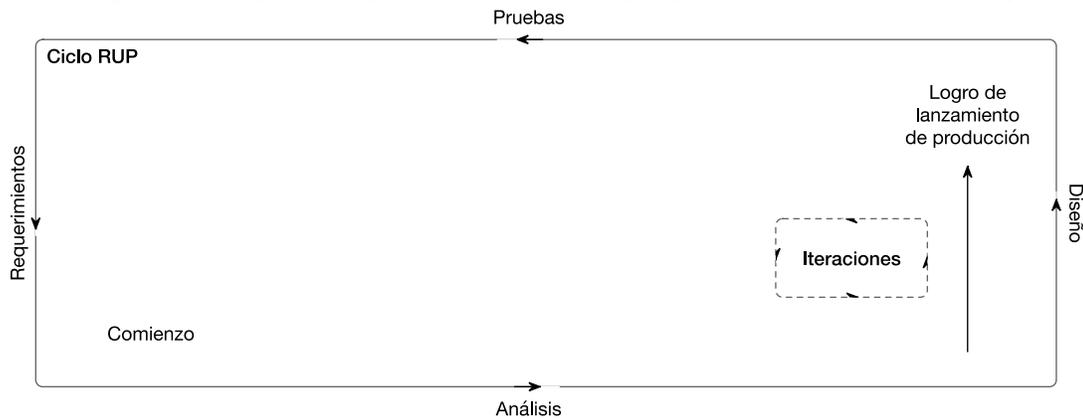
La metodología RUP es un lenguaje basado en casos, centrado en la arquitectura, iterativo e incremental. El proceso unificado se repite en una serie de ciclos, donde cada ciclo forma una versión del sistema (Jacobson, Booch y Rumbaugh, 2000; Castro, Cervantes y Velazco, 2016). Un ciclo en RUP consta de cuatro fases discretas en los procesos de desarrollo de software, que son:

- Comienzo. Logro de objetivos del ciclo de vida.
- Elaboración. Logro de la arquitectura del ciclo de vida.
- Construcción. Logro de capacidad operativa inicial.
- Transición: Logro de lanzamiento de producción.

Cada fase se puede presentar de forma iterativa con la entrega incremental de resultados o logros. Una iteración es un conjunto de las siguientes disciplinas o flujos de trabajo: requisitos, análisis, diseño y pruebas, como se muestra en la Figura 4.

RUP está directamente relacionado con el uso de diagramas de UML, por ser un lenguaje estándar para el modelado orientado a objetos (Kimmel, 2005; Fontela, 2012). Los modelos proporcionan información sobre los requisitos del sistema, en este caso, un Sistema de Control del Detector (DCS) para un experimento HEP de mediciones de alta precisión (Beltrán y González, 2003). Otro aspecto de los modelos es que pueden generar una abstracción para simplificar y seleccionar las características esenciales de un sistema. UML tiene muchos tipos de diagramas y muchos tipos de modelos de sistemas (ver Figura 5).

Figura 4. Diagrama de bloques del flujo de datos del detector y el procesamiento de datos en tiempo real.



Nota: Elaboración propia con información tomada de Sommerville (2011), Kimmel (2005) y Fontela (2012).

Las investigaciones han demostrado que usar solo cinco diagramas UML son suficientes para representar lo esencial de un sistema (Sommerville, 2011). En consecuencia, el diseñador del sistema requiere mantener un equilibrio entre eficiencia y complejidad con respecto al número de dichos diagramas UML. Los siguientes cinco diagramas UML se consideran para el desarrollo del nuevo DCS:

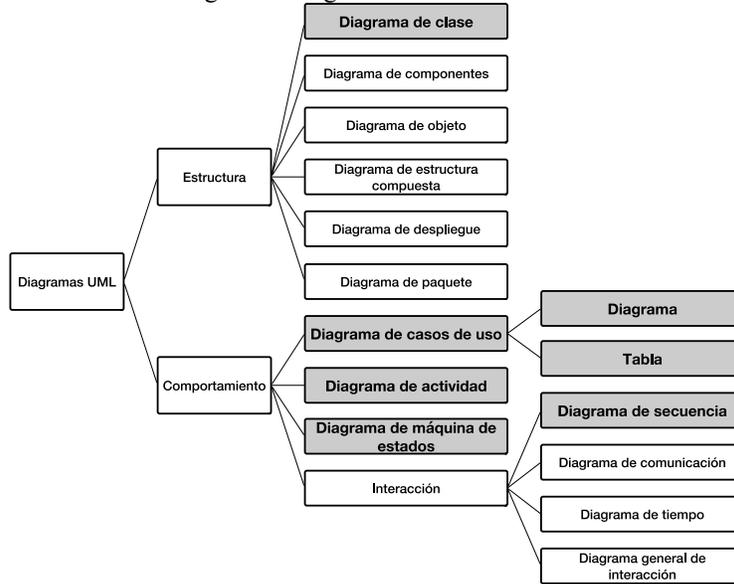
- Diagramas de clases: permiten describir la estructura de un sistema definiendo las clases, atributos, operaciones y relaciones entre los diferentes objetos.
- Diagramas de casos de uso: capturan la funcionalidad de un proceso a través de un conjunto de eventos que experimenta un actor.
- Diagramas de actividades: permite personalizar los casos de uso mediante la representación de actividades incluidas en un proceso o en el procesamiento de datos.
- Diagramas de estado: describe cómo debe comportarse el sistema ante eventos internos y externos en particular.
- Diagramas de secuencia: representan las interacciones continuas entre los actores y el sistema, y entre los componentes de este.

Análisis de áreas de oportunidad de la AI en el DCS del HEPs

Actualmente, los experimentos HEP tienen limitaciones en la recuperación de errores sin intervención humana durante la operación de los sistemas de control (De Cataldo et al., 2011). Por lo tanto, la aplicación de algoritmos de inteligencia artificial en el DCS es una oportunidad de mejora para lograr la recuperación automática de errores y un rendimiento más estable del experimento.

Una fuente potencial de errores en un detector puede estar relacionada con la variación de los niveles de corriente y voltaje en las fuentes de alimentación de LV y HV; así como en los cambios en la temperatura, niveles de radiación, envejecimiento, entre otros. Lo que repercute en una disminución de la cantidad de carga y calidad de los datos obtenidos durante la toma física de datos del detector. Con esto en mente, la capacidad del DCS para aprender de los conjuntos de datos de dichos niveles sin programación explícita podría ayudar a reducir el tiempo de recuperación de errores, ya que la intervención de un humano será cada vez menos necesaria, conforme el DCS aprende de los conjuntos de datos de los niveles obtenidos de cada corrida del experimento HEP. Esta rama de la AI se conoce como Machine Learning (ML). En este caso, debe evaluarse la implementación de la propagación hacia adelante con Redes Neuronales Convolucionales (CNNs) y la implementación de la propagación hacia atrás con la Red Neuronal Recurrente (RNNs) (Mejía-Camacho, 2023; Dubiński et al., 2024). Considerando el factor X como los niveles mencionados anteriormente, mientras que la salida Y será definir si el error requiere la intervención humana para ser resuelto. Las descripciones de RNNs y CNNs para el experimento HEP también se pueden apreciar en la Figura 6.

Figura 5. Diagramas UML a utilizar.



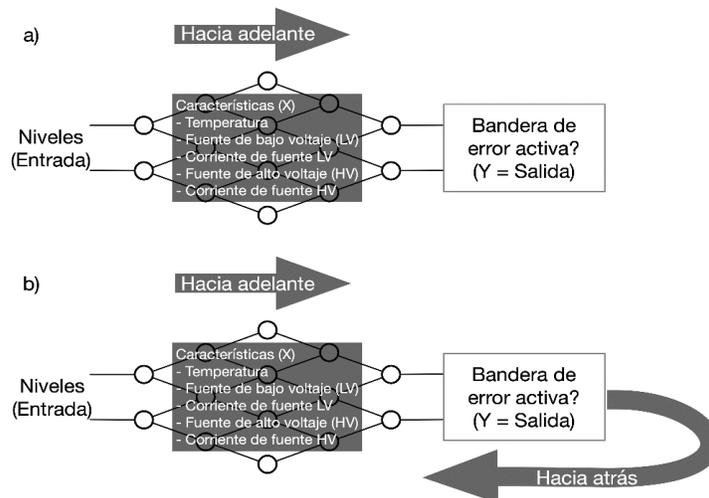
Nota: Elaboración propia con información retomada de Sommerville (2011), Kimmel (2005) y Fontela (2012).

Discusión

El diseño del DCS varía para cada detector debido a la diferencia entre el número de canales de datos, así como de los subsistemas requeridos para su operación y complejidad de estos últimos, principalmente. De tal manera que, este sistema de control debe ser personalizado para cada detector considerando lo anterior y de conformidad con los lineamientos y estándares de diseño del grupo de expertos en el DCS del experimento y del acelerador. A pesar de lo anterior, una metodología de diseño estandarizada, como la propuesta en este trabajo, podría facilitar la labor de los responsables de desarrollar estos sistemas que no cuentan con experiencia previa, así como de consulta para las dudas que pudieran tener los demás desarrolladores en determinado momento.

Por otro lado, a pesar de las bondades que pudiera tener la aplicación de los algoritmos de inteligencia artificial en actividades operativas de los sistemas de control en HEPs, no obstante, en un experimento con estas características existen considerables restricciones normativas a las que hay que apegarse y la necesidad de que el detector se encuentre siempre operativo para cualquier tipo de corrida que se requiera, principalmente las relacionados con las colisiones de partículas (físicas). Por lo que, cualquier modificación u actualización adicional a las convencionales requieren ser previamente evaluadas y revisadas por expertos en el DCS del experimento.

Figura 6. Machine Learning: a) CNNs y b) RNNs.



Nota: Elaboración propia con información tomada de Cataldo et al (2011).

Conclusiones

Este artículo recomienda la aplicación de una metodología de desarrollo, en este caso se utilizó RUP junto con los diagramas UML, u otra que determinen, para obtener información sobre los requisitos y casos de uso con que operará el sistema DCS, generar una abstracción del sistema, y seleccionar las características esenciales de dicho sistema. Todos estos esfuerzos están encaminados en facilitar las etapas de diseño, simulación y construcción del sistema de control para cumplir con los requisitos de mediciones de alta precisión de los detectores, que requieren de toma de datos físicos síncronos con procesamiento en tiempo real de un volumen masivo de datos; resultante de la combinación de la alta tasa de interacción y el gran tamaño del evento generado durante una corrida de colisiones de partículas. Prueba de ello, ha sido la participación de los autores en el desarrollo de sistemas de control de dos detectores mexicanos para estudios de física de alta energía.

Finalmente, se plantea como trabajo futuro una revisión e integración más exhaustiva de los algoritmos de inteligencia artificial para lograr la recuperación automática de errores; así como una herramienta para establecer los valores de los parámetros configurables (como voltaje, corriente y elementos de la electrónica) de los subsistemas al inicio de una corrida de toma de datos con base en el desempeño de corridas anteriores utilizando datos experimentales reales de un detector de partículas.

Agradecimientos

Se agradece al Tecnológico Nacional de México / IT Culiacán por el apoyo brindado a través de la Convocatoria 2024: Proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación.

Referencias bibliográficas

- Aamodt, K., Quintana, A. A., Achenbach, R., Acounis, S., Adamová, D., Adler, C., ... y Busch, O. (2008). The ALICE experiment at the CERN LHC. *Journal of Instrumentation*, 3(08), S08002.
- ALICE Collaboration. (2022, November 4). Letter of intent for ALICE 3: A next-generation heavy-ion experiment at the LHC. ArXiv.org. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.02491>
- Acharya, S., Hernandez, R. A., Adamová, D., Adler, A., Adolfsson, J., Aguiaro, D., ... y Boca, G. (2024). ALICE upgrades during the LHC Long Shutdown 2. *Journal of Instrumentation*, 19(05), P05062.
- ALICE DCS. (2007). *The Standard DCS User Interface in ALICE*. Version 3.0.2. ALICE DCS User Interface Component. CERN. http://alicedcs.web.cern.ch/alicedcs/Software/Downloads/AliceDcsUi_v3.0.pdf
- Amos, I. (2008). *The ALICE Silicon Pixel Detector Control and Calibration Systems* [Tesis de Doctorado, Università Degli Studi Di Bari]. <https://cds.cern.ch/record/1103479?ln=es>
- Ananya, A., Poljak, N., y Zyzak, M. (2014). O2: A novel combined online and offline computing system for the ALICE Experiment after 2018. *IOP Publishing: Conference Series*. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/513/1/012037/pdf>
- Beltrán, D., y González, M. (2003). A Proposal for Modeling the Control System for the Spanish Light Source in UML. In *Proceedings of the ICALEPCS2003* (pp. 264-268). <https://accelconf.web.cern.ch/ica03/PAPERS/TU501.PDF>
- Bordalo, P., Nunes, A. S., Pires, C., Quintans, C., & Ramos, S. (2012, May). Control systems: An application to a high energy physics experiment (COMPASS). In *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics* (pp. 20-25). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AQTR.2012.6237669>
- Bortolin, C. (2011). *The ALICE experiment at CERN: development and commissioning of the cooling and control systems of the Silicon Pixel Detector and optimization of the LHC Exchange Interface project* [Tesis de Doctorado, Università Degli Studi Di Udine]. <https://cds.cern.ch/record/1454203/>
- Cabanillas-Noris, J.C., Martínez-Hernández, M. I., y León-Monzón, I. (2016). A Large Ion Collider Experiment (ALICE) Diffractive Detector Control System for RUN-II at the Large Hadron Collider. *International Journal of Computer and Systems Engineering*, 10(3), 118-129. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1123574>
- Cabanillas-Noris, J.C. (2017) *Desarrollo del Sistema de Control del Detector ADA/ADC del proyecto ALICE* [Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Sinaloa]. <https://pci.uas.edu.mx/index.php/repositorio-de-tesis/>
- Cabanillas-Noris, J.C., León-Monzón, I., Martínez-Hernández, M.I., y Rojas-Torres, S. (2019, May). Analysis of Requirements for the Design of a Detector Control System in a High Energy Physics Experiment. In *7th Annual Conference on Large Hadron Collider Physics. 20-25 May* (p. 6). <https://pos.sissa.it/350/006/pdf>
- CAEN Company. (11 de Septiembre de 2024). *Power Supply*. www.caen.it
- Castro, L., Cervantes, H., y Velazco, P. (2016). *Arquitectura de Software. Conceptos y Ciclo de Desarrollo*. Cengage Learning, 166.
- CERN. (15 de Agosto de 2024). *About CERN*. <https://home.cern>.

- Chochula, P., Augustinus, A., Bond, P., Kurepin, A., Lechman, M., Pinazza, O., Rosinský, P., y Pinazza, O. (2013, Octubre). Operational experience with the ALICE Detector Control System. In *Proceedings ICALEPCS*. <https://accelconf.web.cern.ch/icaleps2013/papers/frcoaab07.pdf>
- Chochula, P., Augustinus, A., Bond, P., Kurepin, A., Lechman, M., Lang, J.L., y Pinazza, O. (2017, Octubre). Challenges of the ALICE Detector Control System for the LHC RUN3. In *Proceedings ICALEPCS* (pp. 1-9). <https://accelconf.web.cern.ch/ICALPCS2017/papers/tumpl09.pdf>
- De Cataldo, G., Franco, A., Pastore, C., Sgura, I., y Volpe, G. (2011). The ALICE-HMPID Detector Control System: Its evolution towards an expert and adaptive system. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 639(1), 211-214. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.10.120>
- Diamond Light Source Synchrotron. (08 de Agosto de 2024). *About Diamond*. <https://www.diamond.ac.uk/Home/About.html>
- Dubiński, J., Deja, K., Wenzel, S., Rokita, P., y Trzciński, T. (2024, March). Machine learning methods for simulating particle response in the zero degree calorimeter at the ALICE experiment, CERN. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3061, No. 1). AIP Publishing. <https://cds.cern.ch/record/2875960/files/2306.13606.pdf>
- Esperante, D. (2010). *Design and Development of Electronics and the Control Software for the Silicon Tracker of LHCb* [Tesis de Doctorado, Universidad de Santiago de Compostela]. <https://cds.cern.ch/record/1385876/files/CERN-THESIS-2010-238.pdf>
- Fontela, C. (2012). *UML: modelado de software para profesionales*. Alpha Editorial.
- Franek, B., y Gaspar, C. (2004, Octubre). SMI++ object oriented framework for designing and implementing distributed control systems. In *IEEE Symposium Conference Record Nuclear Science 2004*. (Vol. 3, pp. 1831-1835). IEEE. <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2004.1462600>
- Fukunaga, C. (2000). Standardization of detector control systems. *Japanese Journal of Applied Physics*, 39(4R), 1898. <https://doi.org/10.1143/JJAP.39.1898>
- Jacobson, I., Booch, G., y Rumbaugh, J. (2000). *UML: el proceso unificado de desarrollo de software*. Addison-Wesley.
- Kimmel, P. (2005). *UML demystified*. McGraw-Hill, Inc.
- Lucas, F. (2009). *Design, Development and Verification of the Detector Control System for the TOTEM experiment at the CERN LHC* [Tesis de Doctorado. Universidad de Sevilla]. <https://cds.cern.ch/record/1188078/files/CERN-THESIS-2009-046.pdf>
- Mejía-Camacho, J.M. (2023). *Desarrollo de un Sistema de Control Inteligente para el Detector de FDD del Experimento ALICE para Operación en la Run 3 del LHC* [Tesis de Doctorado, Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Culiacán].
- Mejía-Camacho, J. M., Rodríguez-Ramírez, S.A., Cabanillas-Noris, J.C., Duarte-Galván, C., Fernández-Télez, A., Finogeev, D., Gulbrandsen, K., Herrera-Corral, G., Karavicheva, T., León-Monzón, I., Martínez-Hernández, M.I., Rojas-Torres, S., Serebryakov, D., Slupecki, M., Sukhanov, M., Tejeda-Muñoz, G., Trzaska, W.H. y Vozniuk, N. (2023). Forward Diffractive Detector control system for Run 3 in the ALICE experiment. *Nuclear Instruments Methods in Physics Res., A*, 1050, 168146. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168146>.
- Mercado, J. (2008). *Development of the control system of the ALICE Transition Radiation Detector and of a Test Environment for Quality-assurance of its Front-End Electronics* [Tesis de Doctorado, Universität Heidelberg]. <https://cds.cern.ch/record/1292245?ln=es>
- Observatorio Pierre Auger. (23 de agosto de 2024). ¿Qué es la Radiación Cherenkov? <https://visitantes.auger.org.ar/index.php/que-es-la-radiacion-cherenkov/>
- Pitz, N. (2012). *Gas system, gas quality monitor and detector control of the ALICE Transition Radiation Detector and studies for a pre-trigger data read-out system* [Tesis de Doctorado. Goethe Universität, Frankfurt]. <https://publikationen.uni-frankfurt.de/frontdoor/index/index/year/2012/docId/26317>
- Sommerville, I. (2011). *Ingeniería de Software*. Pearson Educación.
- Synchrotron ALBA. (9 de Agosto de 2024). *About ALBA*. <https://www.cells.es/es/que-es-alba/bienvenida>
- Tomásio, J.A. (2010). *The Control System of the ATLAS/TILECAL* [Tesis de Doctorado, Universidad de Lisboa]. <https://cds.cern.ch/record/915086>
- Xi-Hui, C., Xiao-Xi, X., Xiao-Nan, L., Cui-Shan, G., Yin-Hong, Z., Zhen-Dong, N., Jian., M., y Yi-Gang, X. (2008). Design and implementation of the detector control system for the BESIII drift chamber cosmic ray test. *Chinese Physics C*, 32(8), 649. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-1137/32/8/012>

