

El Experimento DUNE: Nuevas noticias de nuestro aporte desde la EIA

Amelia Betancur. Profesora del Programa de Física Universidad EIA
Daniel Ávila. Investigador Proyecto DUNE Universidad EIA

Agosto 15 de 2024

Es Febrero del año 2024. Un grupo de ingenieros en Dakota del Sur celebra el final de la excavación de cavernas del tamaño de varios campos de fútbol. Además de ser gigantes, estas cavernas han tenido la dificultad de que fueron excavadas a más de kilómetro y medio bajo tierra. En esto han trabajado por más de dos años y han extraído alrededor de 800,000 toneladas de roca.

El reto no era menor, esta es una excavación única, nunca se había excavado algo tan grande que además estuviera tan profundo. El lector podrá preguntarse: ¿para qué tomarse el trabajo de hacer esto? ¿Qué tipo de proyecto puede requerir algo tan grande y profundo a la vez? La respuesta, tal vez inesperada, y casi que contraintuitiva, es el estudio de algo supremamente diminuto, pero de gran interés para la ciencia: Los neutrinos. Estas son partículas fundamentales (no se pueden dividir en partes más pequeñas), supremamente livianas (casi no tienen masa) y llamadas fantasmas porque siempre van volando por ahí atravesando casi todo. En este mismo momento, unos 60.000 millones de neutrinos atraviesan cada centímetro cuadrado de nuestro cuerpo, la mayoría proveniente del Sol. Después de salir de nuestro cuerpo, ellos seguirán viajando y atravesando todo lo que se encuentren en el camino.

Es justamente la naturaleza “fantasma” que tienen estas partículas la que hace que se necesiten estas cavernas gigantes y profundas. Ellas son parte del experimento DUNE (Experimento de neutrinos de gran profundidad, por sus cifras en inglés), un experimento que es manejado por el complejo de laboratorios FermiLab y que es principalmente financiado por el Departamento de Energía de Estados Unidos.

Para entender cómo funcionará el experimento, es necesario primero saber que los neutrinos son de tres tipos: neutrino electrónico, muónico y tauónico. Además, nos debemos mover unos 1300 km hacia el oriente, al complejo FermiLab cerca a Chicago. Allí inicia DUNE. En ese lugar, protones acelerados a energías de 60 GeV o 120 GeV (giga electrón voltio, es una unidad de energía) y a velocidades cercanas a la de la luz chocarán con un blanco de grafito. Este choque producirá grandes cantidades de neutrinos o de su antipartícula, el antineutrino. Una vez producidas, estas partículas viajarán bajo tierra a un detector cercano al punto de colisión. Este detector será una piscina de Argón líquido donde se estudiará la energía de los neutrinos y de cuál de los tres tipos son.

No obstante, por ser fantasmas, la mayoría seguirá viajando bajo tierra hasta llegar a las recién terminadas cavernas en Dakota del Sur. Ahí se encontrarán unas piscinas mucho más grandes de Argón líquido con una tecnología llamada cámara de proyección temporal que servirán como

detectores de neutrinos. El Argón líquido es usado porque al ser un elemento inerte no emitirá señales que imite las de los neutrinos. Además, este es un elemento pesado, con un núcleo grande, lo que hace que sea más probable que un neutrino interactúe con él. En DUNE se estudiarán las señales que dejan los neutrinos al interactuar con el argón cuando la producción en FermiLab es de neutrinos y cuando la producción es de antineutrinos. Es justamente medir las posibles diferencias de interacción entre estos dos modos (modo neutrino y modo antineutrino) la más importante meta de DUNE.

Esquema del experimento DUNE.

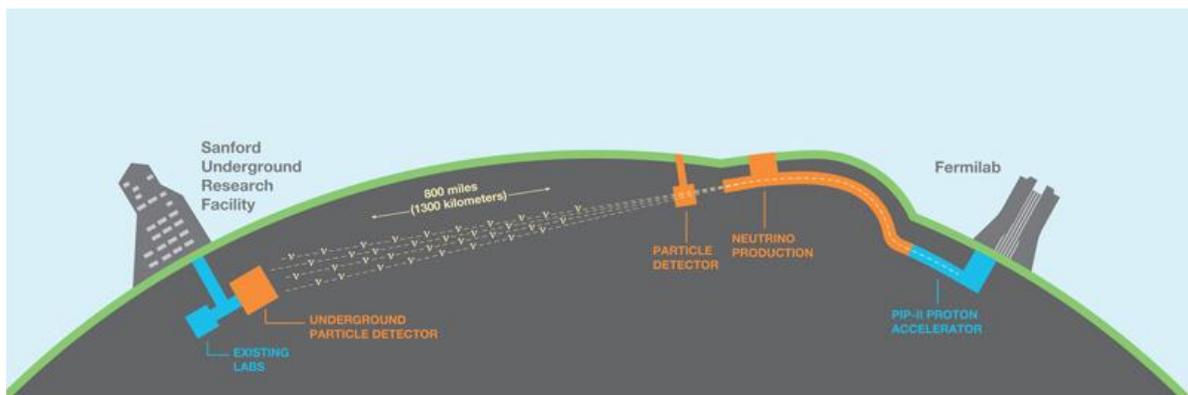


Imagen tomada de FermiLab, Creative Services.

Construir un experimento de tan gran tamaño con tecnología de última generación, como es la del Argón líquido, es un gran reto para la ingeniería y la ciencia. Es por esto por lo que antes de los detectores del experimento se han construido unos prototipos llamados protoDUNE. Estos prototipos están ubicados en el gran complejo de laboratorios CERN (Centro para la investigación nuclear, por sus siglas en francés) cerca a Ginebra en Suiza. Allí se revisa cómo están funcionando los sensores que están dentro del Argón y es que, para capturar estas partículas fantasmas es necesario emplear un arsenal de métodos de detección, entre ellos está el sistema de detección de fotones (PDS por sus siglas en inglés).

Plataforma de neutrinos en CERN. La estructura roja es uno de los protoDUNE ubicado en CERN.



Imagen tomada de: FermiLab, Creative Services.

El PDS y la tarjeta DAPHNE:

Debido al uso de las cámaras de proyección de tiempo basadas en argón líquido en DUNE, y por sus buenas propiedades para el centelleo, además de su costo para producción en masa, el estudio de los neutrinos conlleva a la creación de un sistema de detección de luz, el cual cumple un rol crítico, debido a que permite determinar el momento exacto del evento y generar “triggers” (acontecimientos) donde se determinarán momentos para estudiar los mismos.

Así surge la necesidad de construir el PDS, siendo uno de los sistemas más importantes en el detector lejano de DUNE. El PDS, formado por múltiples módulos de detección y adquisición de datos, busca capturar la información otorgada por los fotoelectrones (electrones generados por interacción a través de fotones) producidos por la interacción de los neutrinos con los átomos de Argón, capturando así aquellos provenientes de procesos de centelleo (fenómeno físico definido como el destello de luz que se emite cuando un material radiactivo golpea una sustancia).

La tarjeta DAPHNE, que del inglés significa electrónica de Detección Para la Adquisición de Fotones de Neutrinos, es el módulo construido por el PDS para adquirir los datos provenientes de centelleo que son capturados por la electrónica fría, la electrónica que está en el Argón líquido. DAPHNE se encarga de tratarlos para ser correctamente leídos por el resto de los módulos, y los envía al resto de elementos que conforman el detector.

La Universidad EIA ha trabajado en su codesarrollo activo desde el año 2019, en el cual se dieron los primeros pasos: desde la definición de materiales, insumos, conexiones, esquemáticos, hasta la construcción de la placa PCB, de su programación, verificación y pruebas. DAPHNE ha pasado por 3 versiones, siendo la primera versión la tarjeta presente en las **instalaciones de la Universidad EIA**; la segunda versión la que se encuentra en pruebas en estos momentos en protoDUNE en la Neutrino Platform del CERN; la tercera versión se encuentra actualmente a la espera de tener su código de funcionamiento finalizado.

A finales del año 2022, el desarrollo de la mayoría de las características que eran solicitadas para la operación exitosa de DAPHNE había sido alcanzado; solo bastaba con refinar algunos detalles. Sin embargo, debido a la gran cantidad de datos que se procesan constantemente dentro de la tarjeta electrónica, siempre existe la posibilidad de que el ancho de banda no fuera suficiente para poder enviarlos. Es allí cuando surge la necesidad de limitar el uso de los sistemas de transmisión de datos a aquellos casos que eran de real interés para el consorcio: transmitir la información cuando realmente haya la detección de eventos relacionados con fotoelectrones.

Este tipo de estrategia de reducir el ancho de banda consumido por el sistema, se le da un nombre mucho más general, conocido como el “self trigger”, que sería un módulo dentro del sistema capaz de reconocer autónomamente cuando los datos procesados corresponden a un evento y ordenarle al resto de DAPHNE que los envíe, ignorando así todo aquello que represente ruido o no sea la señal de interés.

El equipo de trabajo en la Universidad EIA decide enfocar sus esfuerzos en construir un módulo de “self trigger” que cumpliera de forma eficiente con la tarea para la que fue diseñado, buscando a su vez optimizar los recursos de hardware que requería. Múltiples estrategias fueron utilizadas, desde unas más simples hasta más complejas, llegando inclusive a pasar por métodos más innovadores, como el uso de la inteligencia artificial en la FPGA.

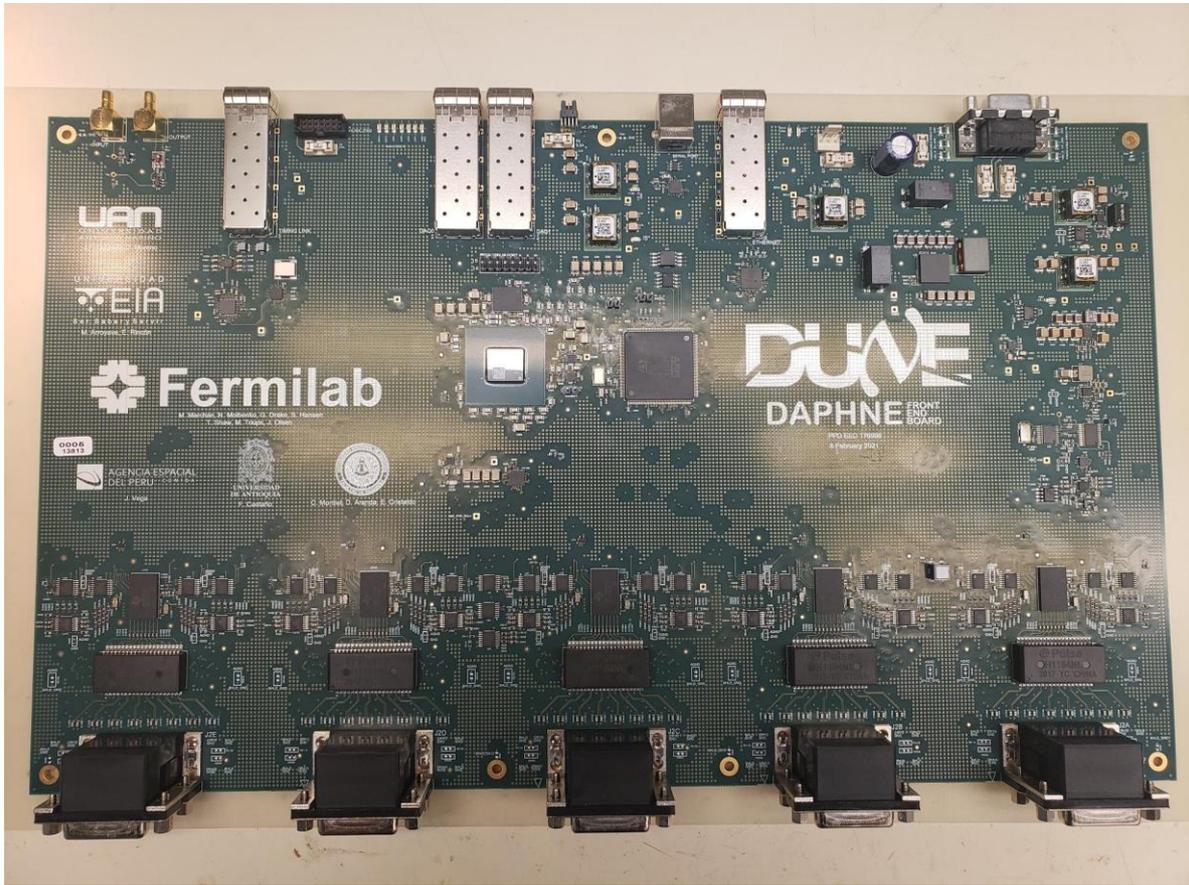
Finalmente, un simple algoritmo que se encarga de verificar las semejanzas entre una señal base y la señal de entrada a la tarjeta fue el desarrollado durante la mayor parte del año 2023. A finales del mismo, el algoritmo fue adaptado para ser probado con un generador de señales y la versión 1 de la tarjeta DAPHNE presente en las instalaciones de la **Universidad EIA**.

Allí, se llegó a la conclusión de que podría alcanzar casi el 100% de eficiencia, puesto que en una prueba con 10000 triggers manuales, el sistema capturó automáticamente la misma cantidad de eventos manuales que fueron ingresados. Toda vez que se verificó que el sistema podría tener el desempeño deseado, para el año 2024, se pasó a una etapa de refinamiento y depuración del código VHDL que sería presentado al consorcio, múltiples líneas de código repetitivo fueron transformadas en ciclos que hacían del código mucho más legible y simple de replicar.

Posteriormente, el ingeniero Daniel Ávila Gómez realizó un viaje al Consejo Europeo para la Investigación Nuclear (CERN), donde se encuentra el prototipo del experimento DUNE (ProtoDUNE). Allí, donde se encuentran los diversos elementos que conforman el detector, también se cuenta con varios módulos de tarjetas DAPHNE, las cuales ya se encuentran en operación y recibiendo datos de centelleo.

El módulo de self trigger fue probado, teniendo una eficiencia inicial considerable y siendo por ahora la versión elegida para operaciones del prototipo. Actualmente, el equipo de trabajo se encuentra fusionando el módulo con otros requerimientos que han surgido con la presencia de este self trigger para DAPHNE, con el fin de darle un funcionamiento óptimo, y que entregue mucha más información a los físicos, facilitándoles el análisis de los datos, todo esto, con el fin de comprender más nuestro universo.

Foto de la tarjeta electrónica DAPHNE que se encuentra en la Universidad EIA.



REFERENCIAS

<https://news.fnal.gov/2024/02/excavation-of-colossal-caverns-for-fermilabs-dune-experiment-completed/>

<https://arxiv.org/abs/2002.03005>

<https://home.cern/news/news/experiments/protodunes-argon-filling-underway>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890021930991X>

<https://arxiv.org/pdf/1511.07718>

[https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/scintillation#:~:text=Scintillation%20is%20defined%20as%20a,Engineering%20\(T%20Edition\)%2C%202012](https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/scintillation#:~:text=Scintillation%20is%20defined%20as%20a,Engineering%20(T%20Edition)%2C%202012)

<https://www.mdpi.com/2673-9984/8/1/58>

<https://ascun.org.co/llego-a-colombia-la-tarjeta-electronica-daphne-codesarrollada-por-investigadores-de-la-eia/>

<https://inspirehep.net/literature/1416470>