



Argón líquido  
en un criostato  
con 35 toneladas  
de capacidad  
utilizado en el  
Fermilab

# Científicos brasileños desarrollan un método de purificación del argón líquido para el experimento internacional Dune, que buscará detectar estas partículas misteriosas

RENATA FONTANETTO

Publicado en octubre de 2024

**L**a iniciativa multimillonaria denominada Deep Underground Neutrino Experiment (Dune), liderada por el Fermilab, el principal laboratorio de física de partículas de Estados Unidos, cuya puesta en marcha está prevista para finales de esta década, utilizará una tecnología brasileña innovadora. Con el apoyo de otras instituciones de investigación científica y de empresas nacionales, un equipo de físicos de la Universidad de Campinas (Unicamp) desarrolló un método de filtrado que extrae un tipo de impureza habitualmente presente en el argón líquido: los átomos de nitrógeno.

El argón, un gas noble a temperatura ambiente, se conserva en cámaras a una temperatura de 184 grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) bajo cero, en estado líquido, lo que permite su utilización para alcanzar el objetivo principal del experimento: la detección de neutrinos, partículas subatómicas misteriosas, casi sin masa, de carga eléctrica nula y que rara vez interactúan con algún material. Dado que su núcleo atómico es relativamente pesado, este elemento químico tiene mayores probabilidades de interactuar con los neutrinos, la segunda partícula más abundante del universo después de los fotones (partículas de luz).

Las cámaras de argón líquido constituyen lo más avanzado que existe en materia de detección de neutrinos. Cuanto mayor es su volumen, más probabilidades hay de interacción con estas partículas. Por esta razón, el experimento Dune contará con cuatro piscinas, cada una con 17.000 toneladas de este elemento químico líquido. Con todo, algunos contaminantes en el interior del tanque podrían comprometer los resultados de los experimentos. Los tres más comunes son el oxígeno, el agua y el nitrógeno. Para los dos primeros tipos de impurezas existen filtros moleculares eficientes. No así para el nitrógeno, al menos hasta que el equipo brasileño dio a conocer su invención.

Los contaminantes suelen estar presentes en magnitudes del orden de 10 partes por millón (ppm), es decir, muy pocos microgramos por cada gramo de argón. “Este nivel de impureza hace inviable llevar a cabo el experimento y no es posible adquirir en el mercado argón líquido con un grado de pureza mayor”, explica el físico Pascoal Pagliuso, líder del grupo

de la Unicamp que desarrolló el nuevo método. “El grado de pureza requerido para el éxito del Dune es de poquísimas moléculas de impurezas, del orden de partes por billón”.

El Dune es el mayor experimento en construcción para el estudio de los neutrinos, en el que ya se han invertido 3.300 millones de dólares. Consta de una instalación dedicada a la producción de un haz de billones de estas partículas, denominada Long Baseline Neutrino Facility (LBNF), montada en el Fermilab, y de dos detectores separados por una gran distancia. Todo comienza en el acelerador de partículas del Fermilab, en Batavia, un municipio situado en las afueras de Chicago, estado de Illinois [EE. UU.]. A partir de las colisiones de protones se generan partículas más pequeñas, que decaen dando origen a otras partículas. Los neutrinos constituyen uno de los subproductos de estas colisiones y transformaciones de la materia que tienen lugar en el acelerador, y el LBNF se ocupa de recoger y dirigir hacia los dos detectores, bajo tierra, un haz compuesto únicamente por estas partículas.

El primero, más pequeño, funcionará al lado, cerca de la fuente de neutrinos del Fermilab, en una cueva poco profunda situada a 60 metros bajo tierra. El segundo, mucho mayor, estará ubicado a 1.300 kilómetros en el interior de una antigua mina abandonada en Lead, un municipio en el estado de Dakota del Sur. En esta localidad funciona actualmente la Sanford Underground Research Facility (Surf), una instalación que albergará el detector en una cueva que se está excavando, a 1.500 metros de profundidad y que ha sido diseñada para evitar que la detección del haz de neutrinos en Dakota del Sur se vea interferida por rayos cósmicos y neutrinos procedentes del espacio, como así también por perturbaciones en la superficie terrestre.

Con el apoyo de la FAPESP, los científicos brasileños empezaron a desarrollar en 2020 una forma eficiente de purificar el argón empleando un tamiz molecular poroso conocido como zeolita, a base de aluminosilicato (un compuesto mineral de aluminio, silicio y oxígeno). La investigación básica que dio origen a la tecnología fue un estudio del equipo de Pagliuso en la Unicamp sobre las diferencias entre las moléculas de nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) y argón ( $\text{Ar}$ ) y su respuesta a la aplicación de un campo eléctrico.

El objetivo práctico del estudio consistía en encontrar una zeolita que pudiese adsorber (atraer y fijar) solamente las moléculas de nitrógeno, dejándolas libres de argón. En esta búsqueda fueron fundamentales los conocimientos del químico Dilson Cardoso, de la Universidad Federal de São Carlos (UFSCar), experto en zeolitas. Se realizaron simulaciones por computadora con materiales que podrían funcionar como filtro para separar el nitrógeno del argón. “El modelado computacional nos permitió determinar el comportamiento de los sistemas de circulación y purificación del argón, aportando datos para el diseño de diversas piezas del sistema”, explica el ingeniero químico Dirceu Noriler, de la Unicamp. “Obtuvimos información sobre el tiempo de saturación de los filtros, la cantidad de purificadores necesarios y los ciclos para obtener la pureza deseada”.

**A** continuación, se pusieron en marcha pruebas a escala reducida en un ambiente superfrío controlado con los materiales más prometedores. Para ello, la Unicamp instaló el Criostato de Ensayos de Purificación de Argón Líquido (PuLArC). Este dispositivo, fabricado en acero inoxidable, con capacidad para albergar 90 litros de un fluido por purificarse, fue construido por las empresas Equatorial Sistemas y Akaer. Para el diseño de la parte de refrigeración, el equipo contó con la experiencia del Laboratorio de Criogenia del Centro Brasileño de Investigaciones Físicas (CBPF), de Río de Janeiro. El criostato se asemeja a un termo de doble pared con vacío intermedio e impide que la temperatura del ambiente se transmita al interior del recipiente.

Según el ingeniero de materiales Fernando Ferraz, vicepresidente de Operaciones de Akaer, el experimento hizo posible la generación de modelos 3D de toda la planta de purificación. “Realizamos simulaciones completas del proceso de transporte, montaje e instalación de todos los equipos necesarios para uno de los laboratorios del Dune”, comenta Ferraz. “El proceso de control de pureza del argón requiere ciclos de filtrado en estado líquido y gaseoso, regeneración y condensación”.

Los resultados de las pruebas realizadas en el PuLArC se publicaron en agosto de 2024 en la revista *Journal of Instrumentation*. Según dicho trabajo, un filtro fabricado con el material conocido como Li-FAU, que además de aluminosilicato contiene litio, fue más eficiente a la hora de capturar las moléculas de nitrógeno presentes en el argón líquido. A partir de su empleo, la contaminación en 100 litros de argón, que inicialmente fluctuaba entre 20 y 50 ppm, pudo reducirse a un rango de 0,1 a 1 ppm en menos de dos horas. El filtro también fue probado por el equipo del Dune en un recipiente más grande, con una capacidad de 3.000 litros, y los resultados fueron igualmente satisfactorios.

Ahora el método a base de Li-FAU se encuentra en su fase final de pruebas en el ProtoDune, el prototipo del Dune que funciona en la Organización Europea para la Investigación Nuclear (Cern), en la frontera franco-suiza. Allí, el volumen de argón líquido a purificar es de varias toneladas. El nuevo método ha sido patentado y, en el futuro, podría utilizarse con otros fines. Parece ser versátil y acaso podría emplearse para purificar otros gases como el dióxido de carbono y otros líquidos a escala industrial.

El filtro para extraer contaminantes del argón líquido es la segunda contribución relevante de la

## La trayectoria subterránea de los neutrinos

El haz de partículas atravesará la corteza terrestre entre los estados de Illinois y Dakota del Sur, en Estados Unidos

Stanford  
Underground  
Research Facility

1. A partir de las colisiones de protones en el acelerador del **Fermilab**, se genera un haz de neutrinos que es dirigido hacia los dos detectores subterráneos

Laboratorio existente  
Detector mayor

2. Uno de los detectores está a 60 metros de profundidad, cerca del Fermilab, y el otro, más grande, se encuentra a 1.300 km de distancia, en una cueva situada a 1.500 metros de profundidad



\* Todas las medidas están fuera de escala

FUENTE FERMILAB



Cueva que alberga el experimento Dune en una antigua mina de Dakota del Sur, donde se instalará uno de los detectores de neutrinos

participación brasileña en el Dune, que reúne a 1.400 científicos e ingenieros de 200 instituciones y 35 países. La primera fue el desarrollo de una trampa de fotones, que captura los destellos de luz producidos por la interacción de los neutrinos con los átomos de argón. Invisible al ojo humano, esta luz tiene una longitud de onda de 127 nanómetros. Al almacenar este tipo de registros, la trampa permite estudiar las propiedades de los neutrinos y reconstruir su trayectoria en tres dimensiones. El dispositivo, bautizado X-Arapuca [*arapuca* es un vocablo de origen tupí que en el portugués brasileño se emplea también para decir trampa], fue creado a mediados de la década pasada por los físicos Ettore Segreto y Ana Amélia Machado, de la Unicamp. Su última versión, la 2.0, ya se está utilizando en Estados Unidos.

**L**os neutrinos disparados en el Fermilab viajarán a través de la corteza terrestre y llegarán a los tanques que contienen argón líquido. La interacción con el argón libera electrones y produce centelleos de luz. Un campo eléctrico uniforme dirige los primeros hacia los detectores de electrones. Los fotones generados por los centelleos son capturados por las trampas X-Arapuca. “A partir de los fotones producidos en los destellos puede calcularse en qué momento llegaron los neutrinos, la dirección de procedencia y cómo interactuaron con el argón”, explica Machado. Hasta ahora se desconoce la masa de cada uno de los tres tipos de neutrinos conocidos –muónico, tauónico y electrónico– ni por qué oscilan entre sí al desplazarse.

En el centro de investigaciones Sanford, donde estará ubicado el mayor detector del Dune, al menos dos de los cuatro módulos del experimento contarán con trampas X-Arapuca, conformando un sistema de

fotodetección alrededor de las piscinas de argón líquido. Con fondos aportados por la FAPESP, Brasil se hará cargo de la construcción de parte de los componentes y del montaje e instalación de 6.000 trampas X-Arapuca en uno de los módulos del Dune hasta el inicio de la captación de datos, previsto para 2029. “El mayor reto consistirá en coordinar el proceso de construcción de las trampas en el país y la recepción de los componentes restantes del exterior sin comprometer el cronograma del experimento”, analiza Segreto. “En Brasil fabricaremos las piezas mecánicas y los filtros ópticos, que son los elementos más importantes para el funcionamiento del dispositivo”.

Para el físico Sylvio Canuto, de la Universidad de São Paulo (USP), la inversión en el Dune reviste una gran importancia, ya que revelará detalles sobre los neutrinos y, en consecuencia, sobre la formación del universo. Una de las cuestiones más intrigantes reside en tratar de entender por qué en el cosmos hay más partículas que antipartículas. “Teóricamente, era de esperarse que las partículas y las antipartículas hubieran surgido en proporciones similares al principio de todo. Pero actualmente vemos que el universo está formado mayormente por partículas. El origen de este misterio se atribuye al papel que desempeñan los neutrinos y ahora estamos más cerca de dilucidarlo”, dice Canuto, quien acompaña la participación brasileña en el Dune desde el inicio del proyecto y es asesor de la Dirección Científica de la FAPESP. El próximo paso, según el físico de la USP, consiste en asegurar la participación brasileña en la tarea de analizar los datos producidos en el Dune, erigiéndose así en un *hub* de referencia en el país para toda Latinoamérica. ●