

Principios y elementos de un ciclotrón (Junio de 2005)

Ramiro Moreira, ramiroc@montevideo.com.uy

Resumen—En este trabajo se analizan los principios y elementos de un ciclotrón. Inicialmente se estudian algunas especificaciones del ciclotrón, luego se centra en el principio de funcionamiento y los tipos de ciclotrón. Se describen las características de ocupación, consumo, mantenimiento y servicios anexos necesarios. También se ve el caso concreto de uso de un ciclotrón en la aplicación clínica. Por último se listan los ciclotrones existentes en el cono sur.

I. INTRODUCCIÓN

EL ciclotrón es un tipo de acelerador de partículas ideado en 1931 por Ernest O. Lawrence y M. Stanley Livingstone, en la Universidad de Berkley (California), como acelerador de partículas cargadas. El método directo de acelerar iones utilizando la diferencia de potencial presentaba grandes dificultades experimentales asociados a los campos eléctricos intensos, Lawrence y Livingstone idearon el ciclotrón que evita estas dificultades por medio de la aceleración múltiple de los iones hasta alcanzar elevadas velocidades sin el empleo de altos voltajes.

Los aceleradores de mayor potencia que se construyen actualmente son muy costosos, invirtiéndose más de la mitad de los gastos en la construcción de grandiosos imanes para aceleradores: son los imanes más grandes y costosos del mundo. Son los elementos imprescindibles de la mayoría de los aceleradores de partículas cargadas (ciclotrones). Y aunque el campo magnético en los aceleradores no supera los 15-17 mil Oe, los aceleradores ostentan los récords dentro de las máquinas más grandes que se utilizan en las investigaciones físicas y en la técnica.

Un ciclotrón es básicamente una cámara cilíndrica de alto vacío en la que mediante un campo magnético paralelo al eje del cilindro y un sistema de radiofrecuencia para generar un campo eléctrico alternante, es posible acelerar a energías muy elevadas (~10 MeV) partículas elementales (como protones y deuterones) producidas mediante una fuente de iones situada en el centro de la cavidad. Estas partículas se hacen chocar con los blancos, en los que tienen lugar reacciones nucleares que llevan a la obtención de los isótopos emisores de

positrones, que serán finalmente utilizados para sintetizar los diferentes radiofármacos. Existen una gran variedad de ellos dependiendo de la potencia (intensidad del haz), la energía hasta la cual se pueden acelerar las partículas-proyectil, los blancos a utilizar, etc..

Los físicos crearon los aceleradores con dos fines principales: para descubrir partículas nuevas o investigar la estructura de los objetos del micromundo (es decir, las propias partículas). Las partículas desconocidas anteriormente pueden obtenerse en el acelerador durante la interacción de las partículas aceleradas con los núcleos de diversos elementos. El estudio de las pequeñísimas estructuras del micromundo en los aceleradores se funda en que el flujo de partículas aceleradas, de acuerdo con las leyes de la mecánica cuántica, se puede presentar como ondas de determinada longitud. Cuanto mayor es la energía de la partícula acelerada, tanto menor es la longitud de la onda. De la física se conoce que son visibles solamente los objetos, cuyas dimensiones lineales superan la longitud de la onda (las ondas luminosas tienen una longitud relativamente grande y, por eso, las posibilidades del microscopio corriente de observar objetos pequeños son muy limitadas[1].



Fig. 1. Ciclotrón

XIV Seminario de Ing. Biomédica 2004
Facultades de Medicina e Ingeniería - Univ. de la República Oriental del Uruguay

Monografía vinculada a la conferencia de la Dra. Henia Balter sobre "Ciclotrón y PET del núcleo atómico a la imagen molecular por tomografía de emisión de positrones" del 27 de mayo de 2005.

II. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

La parte interna del ciclotrón es como lo muestra la Fig. 2,

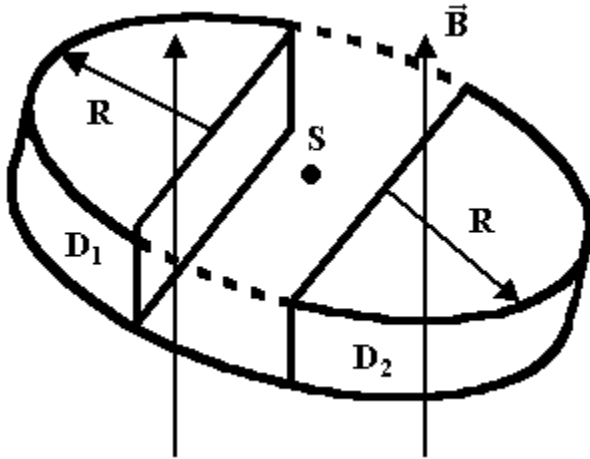


Fig. 2. Estructura interna de un ciclotrón.

D1 y D2 son dos cámaras metálicas de forma semicilíndrica huecas llamadas “dees”, por su similitud con la letra D. El punto S es dónde se encuentra la fuente de iones situada en el centro de la des. Las dos des se hallan separadas una de la otra y las dos están en el seno de un campo magnético uniforme y perpendicular (normal) al plano de las “dees”. Las dos des están conectadas a los bornes de un circuito eléctrico que crea una diferencia de potencial alterna de frecuencia ω .

En la Fig. 3 se detalla el funcionamiento del ciclotrón, inicialmente la partícula cargada q entra en D2 con velocidad v_1 debido a la aceleración que le produce al campo eléctrico existente entre las dos des. Bajo la acción de el campo magnético describe una circunferencia de radio r_1 y frecuencia ω (1) y (2). Cuando q sale de D2 se ha invertido al campo eléctrico siendo la partícula acelerada entre las dos des, por lo cual entra en D1 con una velocidad $v_2 > v_1$ describiendo una circunferencia de radio $r_2 > r_1$ (3). Siendo R el radio de las des, la velocidad máxima con que sale la partícula es (4). Su energía cinética final será tantas veces mayor que la que corresponde al voltaje aplicado a los electrodos multiplicado por el número de veces que el ion ha pasado por la región intermedia entre las “dees” (5) [1].

$$r_1 = \frac{m \cdot v_1}{q \cdot B} \quad (1) \quad \omega = \frac{B \cdot q}{m} \quad (2)$$

$$r_2 = \frac{m \cdot v_2}{q \cdot B} \quad (3)$$

$$v_{\max} = \frac{R \cdot B \cdot q}{m} \quad (4)$$

$$E_C = \frac{1}{2} m \cdot v_{\max}^2 = \frac{1}{2} \frac{q^2 \cdot B^2 \cdot R^2}{m} \quad (5)$$

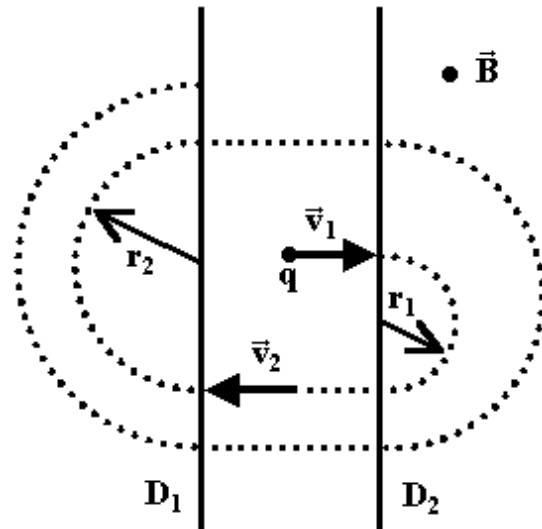


Fig. 3. Movimiento de una partícula dentro de un ciclotrón

III. TIPOS DE CICLOTRÓN

A. Ciclotrón clásico

Acelerador de partículas en el que se inyecta un chorro de partículas en el seno de un campo magnético, que las acelera en una trayectoria circular. A medida que las partículas ganan energía, el campo las obliga a recorrer una espiral creciente, saliendo al final proyectadas en línea recta del acelerador.

B. Sincrotrón

En 1943 se sugirió una nueva idea para la construcción de aceleradores de partículas similares a los ciclotrones. La idea fue desarrollada en 1945 de forma simultánea por McMillan en EE.UU. y por Veksler en la URSS. El principio de funcionamiento del sincrotrón es idéntico al del ciclotrón, ya que las partículas se aceleran en una trayectoria circular. Sin embargo, para sincronizar con precisión la intensidad del campo que proporciona energía a las partículas con la ganancia de masa de éstas debida a los efectos relativistas, se utiliza un campo eléctrico oscilante. Dicho campo permite dar a las partículas la energía necesaria en cada momento. El principio de funcionamiento del sincrotrón, que en principio fue concebido para acelerar electrones, puede aplicarse igualmente a otros aceleradores. La energía máxima que un sincrotrón puede proporcionar a los electrones se ve limitada por la circunstancia de que, según predicen las ecuaciones de Maxwell, los electrones en movimiento emiten energía en forma de radiación electromagnética. Llegado un cierto momento, esa radiación sincrotrónica es igual a la ganancia obtenida del campo del sincrotrón. Por otra parte, a diferencia de lo que ocurría en uno de los antiguos ciclotrones, los aceleradores basados en el principio de sincrotrón no producen un chorro continuo de partículas aceleradas, sino pulsos de partículas.

C. Sincrociclotrones

Hoy en día todos los ciclotrones son en realidad sincrociclotrones, ya que el campo acelerador de las partículas es un campo oscilante similar al usado en un sincrotrón, lo que permite sincronizar con mayor eficacia la ganancia de masa/energía.

D. Microtrones

Los microtrones son los ciclotrones más pequeños su función es la aceleración de resonancia de los electrones en el campo eléctrico de frecuencia de microonda. En los imanes de los microtrones se utiliza, generalmente, una inducción del campo magnético pequeña: diez veces menor, aproximadamente, que en los ciclotrones.

E. Ciclotrones isócronos

Cuanto mayor es la intensidad del campo magnético, tantas más revoluciones hace la partícula cargada en una unidad de tiempo. Surge una pregunta: ¿no sería posible hacer que el campo magnético crezca desde el centro hacia el extremo de los polos? En este caso el aumento de la masa de la partícula y, por consiguiente, su "torpeza" a medida de crecer su energía, podrían compensarse, y la energía de las partículas obtenidas en el ciclotrón, crecerá. Mas en los ciclotrones se hace al revés: se disminuye el campo magnético hacia el extremo del polo, realizando así el "enfoque vertical". ¿Cómo conciliar estas dos exigencias opuestas? ¿Cómo obtener simultáneamente el enfoque vertical y el crecimiento del campo desde el centro del polo hacia la periferia? Este problema atrajo la atención desde hace mucho. Todavía en el año 1938, el científico norteamericano Thomas propuso una fórmula de acuerdo a la cual se debía cambiar el campo magnético en el entrehierro del ciclotrón isócrono, a fin de que estas dos exigencias se asegurasen simultáneamente. Mas la forma del polo resultó ser demasiado complicada. Por eso, en aquel tiempo, la idea de un ciclotrón isócrono contaba con pocos partidarios. Sin embargo, más tarde, la situación cambió. Los "ingenieros-físicos" propusieron, en vez de los complejos polos de Thomas, aprovechar polos cilíndricos corrientes con piezas polares de acero de forma sencilla. Como se aclaró, tales piezas aseguraban al mismo tiempo el aumento del campo según el radio y el enfoque vertical. Para corregir el campo en el entrehierro del ciclotrón isócrono se aplica, generalmente, un complejo sistema de devanados y piezas correctores concéntricos o sectoriales (Fig. 4).

Los ciclotrones isócronos permiten elevar la energía de las partículas obtenidas en los aceleradores de ese tipo hasta 700-800 MeV. El aumento ulterior de la energía se complica debido a que, por causas tecnológicas, es difícil cumplir exactamente todas las exigencias en cuanto a la configuración del campo magnético de los ciclotrones de energías tan altas[1].

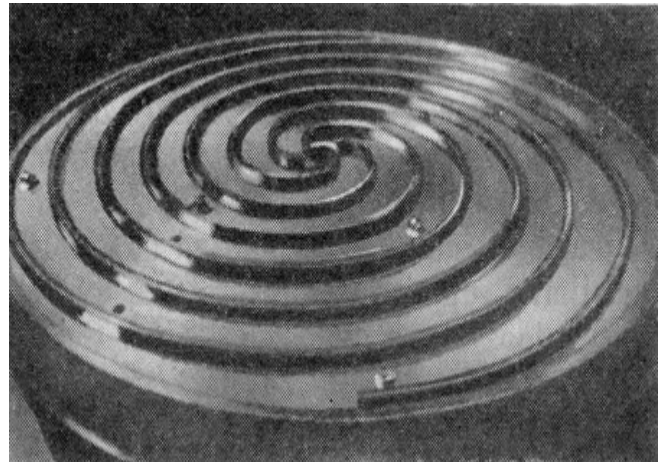


Fig. 4 Forma ingeniosa de polos que contribuyen a aumentar la energía de las partículas que se obtienen en el ciclotrón.

IV. INFRAESTRUCTURA

A Requerimientos de la sala

Las especificaciones típicas para el diseño del sarcófago son: Sala del ciclotrón (Sarcófago): según el tamaño del ciclotrón es la sala (ejemplo -Área mínima 4 m x 4 m y Altura mínima 3m). El ciclotrón, debido a su peso, tiene que estar ubicado en el nivel de más bajo posible del edificio:

- Peso del ciclotrón 23 toneladas métricas en 4 pilares

- Diámetro del círculo del pilar 28 cm

- Superficie de apoyo del pilar 615.7 cm

- Carga x pilar 10 kg/cm

Debe construirse un hoyo bajo el ciclotrón. Este hoyo estará conectado por ductos para cables o por una trinchera a la sala de suministro de energía.

- Hoyo debajo del ciclotrón 40 cm profundo

Toma de tierra: Debe instalarse una toma de tierra (10 Ohms) accesible desde el hoyo del ciclotrón. Los pies del ciclotrón deben estar colocados en cuatro anclajes metálicos planos localizados en el mismo nivel (la diferencia de nivel debe ser de menos de 1mm).

Sala de suministro de energía: Área mínima "- 4.2 m x 2.5 m y Altura mínima 2.2 m. La sala de control y la sala de suministro de energía requieren un suelo elevado del tipo del de las salas de ordenadores. La distancia entre el sala de suministro de energía y el ciclotrón no puede exceder 20 metros y la distancia entre el PLC y los otros salas no puede exceder 80 metros.

Laboratorio de radioquímica: El laboratorio de radioquímica no necesita estar en el mismo nivel que el ciclotrón, aunque las células calientes que alojan los módulos de química estarán ubicadas tan cerca como sea posible del sarcófago del ciclotrón.

B. Protección contra el polvo

Todos los pisos, el techo y muros incluyendo el interior de las trincheras y otras aberturas recibirán una mano de un producto repelente contra el polvo. Es recomendado que todas las superficies se pinten en un color ligero y antes de

comenzar la instalación ya que ello mejora la visibilidad y proporciona seguridad.

C. Electricidad

El suministro de el fluido eléctrico debe ser:

- Corriente alterna 380 V: 5 el %, 50/60 Hz: 1 el %.
- Instalación de 5 cables (3 fases + tierra + neutro).
- Consumo de energía eléctrica: 70 kW

Hay que cumplir todas las reglas eléctricas estándar locales (tipos de cable, códigos de colores, normas de seguridad,...). El suministro eléctrico del ciclotrón debe ser diferenciado del de el resto del edificio y del que suministre luz, ventilación o agua. En cada sala deben preverse varios enchufes monofásicos. Para las razones de seguridad, deben instalarse "setas" cortacorrientes de emergencia en:

- El sarcófago, cerca del ciclotrón
- La sala de suministro de energía
- La sala de control

D. Alumbrado

Debe colocarse un alumbrado adecuado y suficiente en todas las áreas de trabajo. Se recomienda colocarlo en un plano de unos 1,25 m de término medio (50 ")

- En sala del ciclotrón 500 Lux
- En sala de suministro de energía 500 Lux
- En la sala de control 500 Lux

Es recomendable un alumbrado de emergencia

E. Suministro de agua refrigerada

Se debe instalar un sistema secundario de refrigeración por agua como soporte al sistema primario del cambiador de calor del ciclotrón. Debe preverse una línea de suministro de agua.

En lugar de un sistema para la extracción de calor mediante un circuito de agua puede utilizarse un sistema de intercambiador de calor.

F. Conducciones y Abastecimiento de Gas

Se debe contar con depósitos para los gases de proceso (para el ciclotrón, blancos y sistemas de química), la provisión de gases necesarios y los reguladores para las botellas del gas. Hay que tener todas las líneas de gas y conexiones con los depósitos de gas para el sarcófago del ciclotrón, gas de enfriamiento, y para las células calientes.

G Ventilación y Refrigeración

Las salas de control y de suministro de energía deben estar refrigeradas por aire para asegurar una operación óptima de los equipos electrónicos. Las otras áreas requieren una climatización standard. La humedad relativa nivel no excederá 50 % en todas las áreas pertinentes. Debe asegurarse una presión negativa de 25 a 40 Pa en la salas de radioquímica y en el sarcófago del ciclotrón. El sistema de ventilación se diseñará conforme a los códigos locales y a las reglas de salud y de seguridad.

Sala del ciclotrón (Sarcófago):

- Límites de temperatura 17-28 °C
- Niveles de humedad El. % 35-50 baja condensación
- Energía disipada en el aire < 3 KW

Sala de suministro de energía:

- Límites de temperatura 17-28 °C
- Niveles de humedad El. % 35-50 baja condensación
- Energía disipada en el aire < 14 KW

Sala de radioquímica:

- Límites de temperatura 10-30 °C
- Niveles de humedad El. % 35-50 baja condensación
- Energía disipada en el aire < 3 KW

G. Calefacción

La temperatura mínima mantenida en todas las áreas pertinentes deberá ser de 18 °C y la temperatura máxima será 25 °C.

H. Protección de la Radiación

Se tienen que cumplir todos las leyes y reglas locales en relación con la seguridad y radioprotección. El edificio y toda el área de trabajo del ciclotrón deben cumplir con todas las normas pertinentes de seguridad y protección contra la radiación durante todas las fases de construcción, instalación, experimentación y operación. Deben instalarse estructuras blindadas y sus tuberías de conexión, requeridas para la operación de módulos de radioquímica.

Se necesita el siguiente equipo:

- Detector gamma dentro y fuera del sarcófago respectivamente con monitorización de la tasa de radiación localizada en el sala de suministro de energía y alarmas visuales y sonoras en caso de sobrepasar el umbral de actividad.
- Control de acceso al sarcófago según el nivel de la tasa de la radiación.
- Vestimenta de seguridad: por ejemplo guantes, polainas, etc.[4].

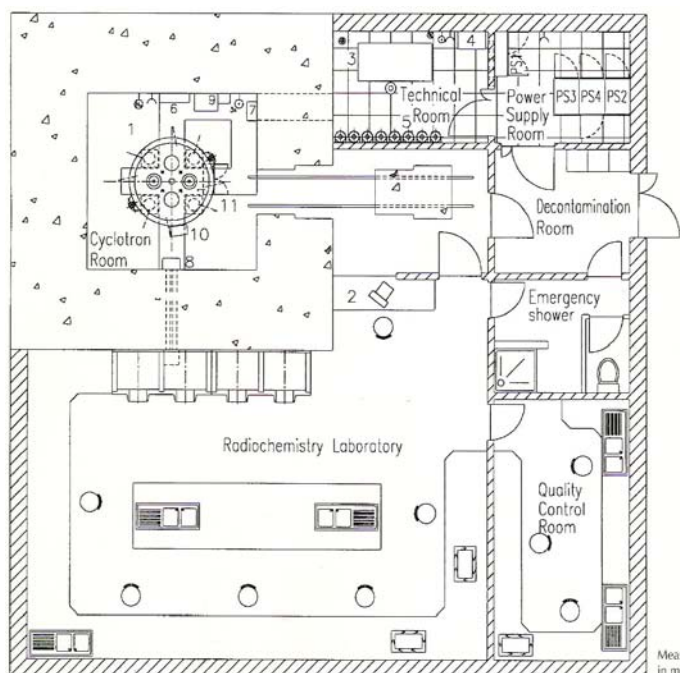


Fig. 5 Planta del un ciclotrón (1.cuarto del ciclotrón 2.control 3.procesador de agua 4.estación hidráulica 5.gas 6.gabinete de gas frío 7.agua 8.gabinete de gas radiactivo 9.intercambiador de He 10.aire 11.blanco de irradiación

V. APLICACIÓN CLÍNICA

El ciclotrón es usado en el mundo en la Producción de Radioisótopos necesarios para aplicaciones clínicas en tomógrafos por emisión de positrones (PET). Es también objetivo del ciclotrón el desarrollo de otros radioisótopos y aplicaciones propias de la tecnología de aceleradores en el ámbito de la investigación básica y aplicada.

Los ciclotrones se clasifican en función del tipo de partícula utilizada (positiva o negativa) o bien en función de la energía a la que éstas pueden ser aceleradas. La utilización de los ciclotrones PET actuales es muy sencilla, puesto que son sistemas muy automatizados. Aunque se pueden manejar de forma manual (con lo que se pueden controlar todos los parámetros de funcionamiento) lo habitual es fijar únicamente la corriente requerida en el blanco, que va a condicionar la actividad que se obtendrá.

La tomografía de emisión de positrones (PET, del inglés Positron Emission Tomography) es una técnica de diagnóstico clínico no-invasivo que permite la imagen funcional "in vivo" del metabolismo celular. Su importancia en especialidades como la Oncología, Neurología o Cardiología está bien avalada por la literatura científica donde gran cantidad de datos sugieren que la PET es superior a las técnicas convencionales de imagen (TAC y RM) en determinadas situaciones clínicas. La PET permite obtener imágenes usando compuestos biológicamente activos, sustratos, ligandos o fármacos marcados con emisores de positrones. Estos agentes marcados se administran normalmente vía intravenosa, distribuyéndose según el flujo sanguíneo y siendo asimilados independientemente de su carácter radiactivo.

Los positrones se forman durante la desintegración radiactiva de un núcleo que tiene un número excesivo de protones para alcanzar la estabilidad nuclear. Tras sucesivas colisiones, el positrón pierde su energía y cuando está prácticamente en reposo se combina (aniquila) con un electrón orbital convirtiéndose la masa de ambas partículas (electrón y positrón en reposo) en energía generándose de dos fotones de 511 KeV cada uno, los cuales serán emitidos simultáneamente y en sentidos opuestos, pudiendo salir del organismo y ser detectados en el exterior.

Los radionucleidos emisores de positrones son isótopos de elementos comunes en el organismo y, en consecuencia, los más apropiados para marcar moléculas y realizar estudios in vivo. La desintegración de un radionucleido emisor de positrones ocurre según el. La emisión del positrón conlleva la estabilización del nucleido generado, ya que éste está más cerca de la línea de estabilidad. La emisión concomitante de un neutrino (ν) en cada desintegración hace que la energía de la emisión del positrón (β^+) sea variable, al contrario de lo que ocurre con las emisiones gamma, que tienen una energía fija para un radionucleido dado debido a que se deben a transiciones entre dos estados energéticos con valores definidos. Se habla por lo tanto de energía máxima y de energía media de emisión del positrón para cada radionucleido. Tras la emisión del positrón, éste recorre una

distancia (que será mayor cuanto mayor sea la energía de emisión del mismo) antes de chocar con un electrón y producirse la aniquilación. En este fenómeno la masa de ambas partículas se transforma en energía según la ecuación $E = mc^2$. La distancia recorrida por el positrón (rango del positrón) hasta su aniquilación es de unos pocos mm (en un medio acuoso, asimilable básicamente a un tejido) y ocurre en un tiempo muy corto desde la desintegración (en torno a 10^{-9} segundos). Las partículas aceleradas son protones, la energía máxima es de 18 millones de electrón volts (MeV), mientras que los deutrones, con el doble de la masa de los protones, alcanzan una energía máxima de 9 MeV[2]-[3].

VI. CICLOTRONES EN LA REGIÓN

A. Argentina

Argentina tiene un ciclotrón, pertenece a la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), emplazado en el Centro Atómico Ezeiza. Se instaló en 1954 es un sincrociclotrón Philips de 56 MeV[5]-[6].

B. Brasil

Tiene 2 ciclotrones iguales, uno pertenece a el Instituto de Ingeniería Nuclear (IEN), de Río de Janeiro y el otro al Instituto de Pesquisas Energéticas y Nucleares (IPEN) de San Pablo. Se instalaron en 1975 son un ciclotrón CV-28 Cyclotron Corp de 28 MeV[6].

C. Paraguay

No tiene ciclotrón

D. Uruguay

Uruguay tampoco tiene un ciclotrón, pero esta previsto que se coloque uno en el Centro de Investigación Nuclear (CIN). Un adelanto tecnológico como la incorporación de un ciclotrón en Uruguay, impactan a diferentes sectores del país, siendo el más inmediato de ellos el ámbito de la salud, y en este sentido es de efecto directo a la ciudadanía, posibilitando la aplicación en Uruguay de una de las herramientas más poderosas en el diagnóstico de diferentes enfermedades, con una técnica que apunta a la determinación de una falla metabólica de las células, lo que sucede normalmente en una fase anterior a la ocurrencia de una diferencia morfológica significativa.

Desde el punto de vista de la salud, el disponer de este acelerador en una institución como el CIN, permite a la comunidad nacional contar con una facilidad única para el estudio y desarrollo de nuevos radiofármacos, algunos de ellos usados como paliativos en enfermedades catastróficas, otros en diagnósticos y otros en radioterapia. Esto permite al país autoabastecerse de estos elementos, los cuales no pueden ser adquiridos en el exterior porque sus semiperíodos son del orden de horas.

E. Chile

Nuevo equipo instalado en la Comisión Chilena de Energía Nuclear, en el Centro de Estudios Nucleares la Reina, en el 2003 y es un ciclotrón IBA Cyclone 18/9(Fig. 1).

VII. CONCLUSIÓN

En este estudio se analizo el ciclotrón que es un acelerador de partículas cargadas por acción de campos eléctricos y magnéticos. Los ciclotrones fueron utilizados por muchos años en aplicaciones físicas para descubrir partículas nuevas o investigar la estructura de las propias partículas. Debido a su gran tamaño y su gran costo no había muchos en el mundo. En los últimos años una nueva tecnología los necesito para aplicaciones clínicas en tomógrafos por emisión de positrones (PET) y esto los hizo más famosos. Debido a esta nueva técnica sería bueno que Uruguay obtuviera un ciclotrón para prestaciones médicas.

REFERENCIAS

- [1] V. P. Kartsvd "Tres milenios del imán". Available: <http://www.geocities.com/tresmileniosdeliman/tama10.html>
- [2] S. M. Qaim "Production of positron emitting radionuclides using cyclotrons".
- [3] I. Hervás Benito y J. F. Martí Vidal, "La Tomografía de emisión de positrones (PET) y la PET-TAC."
- [4] Elaboración de un manual genérico para la instalación de un ciclotrón y salas técnicas anexas para la producción de radiofármacos Available: <http://www.bibliotecnica.upc.es/PFC/arxiu/migrats/34484-6.pdf>
- [5] Página web del Centro nacional de Energía Atómica-Argemntina Available: <http://www.cnea.gov.ar>
- [6] "Cyclotron facilities with radionuclide production programmes in member States-V293". Comisión Nacional de Energía Atómica República Oriental del Uruguay.