

C. N. E. A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
NO 1	AÑO 1976

02.76.14

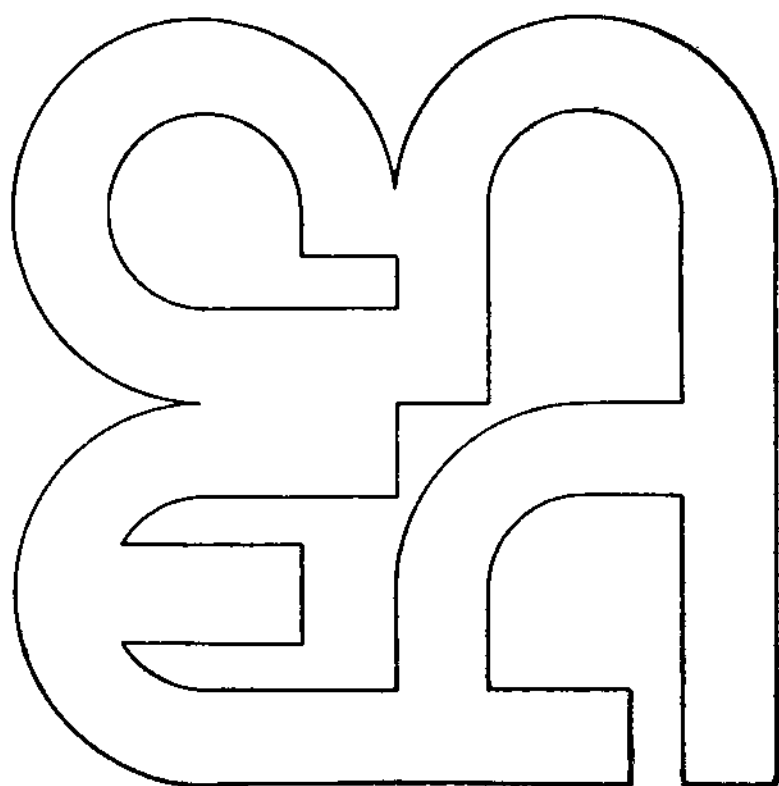
Estudio para la Instalación de un Acelerador Electrostático

Comisión Nacional
de Energía Atómica

Departamento
de Física Nuclear

República Argentina

Buenos Aires - Abril 1976



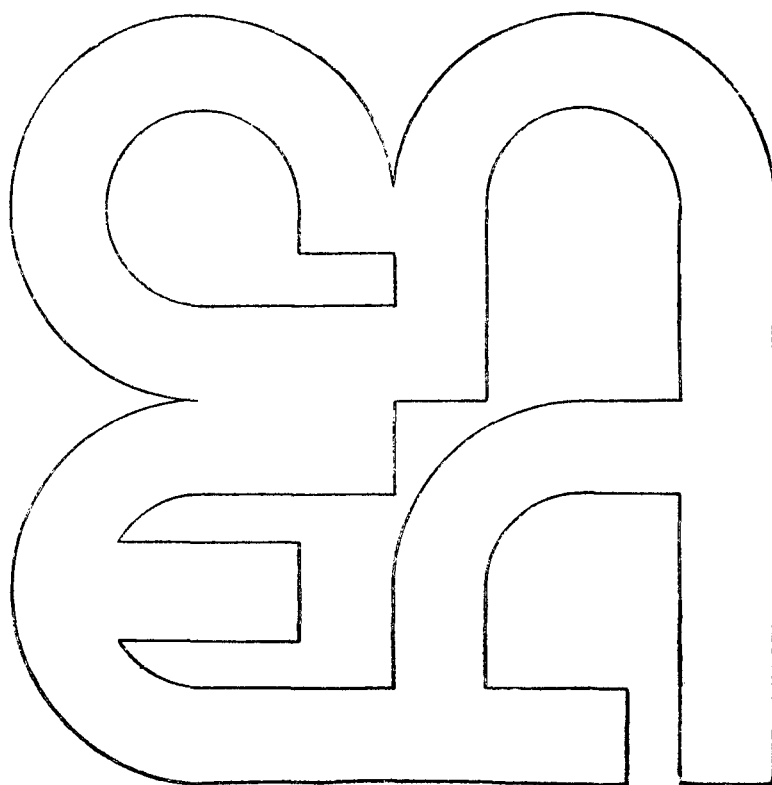
Estudio para la Instalación de un Acelerador Electrostático

Comisión Nacional
de Energía Atómica

Departamento
de Física Nuclear

República Argentina

Buenos Aires - Abril 1976



Este estudio ha sido realizado por los siguientes Investigadores del
Departamento de Física Nuclear:

Daniel R. Bes
Alberto E. Ceballos
Alberto Filevich
Mario A. J. Mariscotti
Emma V. Pérez Ferreira
Ricardo Requejo
Julio J. Rossi
Edgardo Ventura

Buenos Aires, Abril de 1976.

INDICE

I.	INTRODUCCION.....	1
II.	BREVE RESEÑA HISTORICA DE LA INVESTIGACION EN FISICA NUCLEAR EN LA ARGENTINA.....	3
III.	EVOLUCION DE LAS MAQUINAS ACELERADORAS DE PARTICULAS.....	6
	III.1. Generalidades.....	6
	III.2. Ciclotrones.....	7
	III.3. Aceleradores Lineales.....	8
	III.4. Máquinas Electrostáticas.....	9
	III.5. Combinaciones de Distintas Máquinas.....	11
	III.6. Análisis Comparativo.....	11
IV.	DESCRIPCION ESQUEMATICA DE UN ACELERADOR ELECTROSTATICO.....	23
	IV.1. Consideraciones Generales.....	23
	IV.2. Acelerador Van de Graaff.....	24
	IV.3. Componentes del Acelerador.....	24
	IV.4. Sistemas Accesorios.....	27
V.	FACTORES DECISIVOS EN LA ELECCION DE UN ACELERADOR ELECTROSTATICO.....	29
VI.	USOS DE UN ACELERADOR ELECTROSTATICO DE 16 MV EN INVESTIGACION Y DESARROLLO.....	34
	VI.1. Física Nuclear.....	34
	VI.2. Física Atómica.....	36
	VI.3. Física de Estado Sólido.....	37
	VI.4. Astrofísica.....	38
	VI.5. Metalurgia y Física de Reactores.....	39
	VI.6. Aplicaciones en Biología, Medicina y Química.....	39
VII.	CONCLUSIONES.....	41
	APENDICE	
	A. LOCALIZACION.....	43
	B. ESTIMACION DE COSTOS.....	49

I. INTRODUCCION

El objeto del presente trabajo es analizar la factibilidad de la instalación de un acelerador de partículas de baja energía en los laboratorios de la CNEA.

Para ello se describe en primer término la evolución de la Física Nuclear en la República Argentina y el papel decisivo que tuvo, en su momento, la instalación de los aceleradores existentes en la CNEA. A pesar de que este equipamiento cuenta con más de veinte años de antigüedad, el Departamento de Física Nuclear continúa siendo, como desde su creación, el más importante ente de investigación en Física Nuclear del país. Durante todo este tiempo el Departamento ha producido resultados verdaderamente significativos. La publicación "El Sincrociclotrón - Informe Retrospectivo - Período 1954 - 1965" (S.Mayo, Publ. CNEA 188/66) es un resumen del desarrollo de las actividades en sus comienzos. Recientemente el "Informe de Actividades del Departamento de Física Nuclear - Período 1974 - 1975" (Publ. CNEA 2/76) y la adjudicación del premio "Teófilo Isnardi" de la Academia Nacional de Ciencias al Proyecto IALE, constituyen una prueba elocuente de la apertura de posibilidades que significó la instalación de las máquinas mencionadas, no solamente para el desarrollo de la física nuclear sino también para el de otras ciencias.

En el siguiente capítulo se describe la evolución que ha experimentado la tecnología de aceleradores de baja energía en todo el mundo a lo largo de los años, de donde surge, en primer lugar, el grado de obsolescencia de la maquinaria actual del Departamento de Física Nuclear. Este hecho era ya apreciable en 1966, cuando se comenzaron a elaborar las primeras propuestas de conversión del Sincrociclotrón para adecuarlo a los avances de la ciencia y sus herramientas para la investigación. En segundo lugar, del análisis comparado de las dos posibles opciones: ciclotrón isócrono o acelerador electrostático, se concluyen las ventajas técnicas que actualmente presenta este último para su instalación en la CNEA.

Se efectúa, a continuación, una descripción somera de las líneas de trabajo que podrían encararse en el campo de la física nuclear, de contar con tal tipo de máquina, así como de su utilización para el desarrollo de otros campos de investigación básica, aplicada y tecnológica. Conviene destacar aquí que para que todo ello sea posible, no basta instalar un acelerador; por una parte es necesario dotarlo del equipo periférico que optimice su utilización en las líneas de trabajo específicas que, a la fecha de la puesta en operación de la máquina, resulten de mayor significación. Por otra, es también imprescindible disponer de aquellos medios que permitan ampliar el plantel científico en la medida necesaria para asegurar el máximo de utilización men-

cionado. En lo que se refiere al personal técnico, el plantel existente, que ha sido capaz de mantener en actividad máquinas con un alto grado de envejecimiento, garantiza la operación y mantenimiento eficientes de una máquina más moderna, como el acelerador electrostático.

Se resumen, por último, los distintos aspectos del problema en una serie de conclusiones a través de las cuales se aconseja la instalación de un acelerador electrostático de 16 MV, dotado del equipo periférico adecuado a las futuras líneas de trabajo. La versatilidad de este conjunto hará posible el nucleamiento de científicos actualmente dispersos en el país y en el extranjero y contribuirá a la conformación de un centro de capacitación y especialización de nuevos profesionales que podrán luego integrarse a otros grupos de investigación y desarrollo del país, aportando a éstos el nivel de formación adquirido.

II. BREVE RESEÑA HISTÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN EN FÍSICA NUCLEAR EN LA ARGENTINA

La Física Nuclear experimental en la Argentina se ha desarrollado fundamentalmente en torno a los laboratorios del Sincrociclotrón y del proyecto IALE.

El Sincrociclotrón de la Comisión Nacional de Energía Atómica ha prestado importantes servicios durante los primeros veintitres años de su existencia. La máquina fue instalada por Philips (Holanda) durante los años 1952 y 1953. En noviembre de 1954 se realizó la primera irradiación con haz interno con fines de investigación. En 1957 se dispuso de un haz externo, como consecuencia de las modificaciones introducidas por el personal del laboratorio; con ello se ampliaron considerablemente las posibilidades de investigación, no sólo en Física Nuclear, sino también en Química y Biología.

Con posterioridad a esa fecha, se agregó un sistema regenerador-compresor a fin de aumentar la eficiencia de la extracción del haz; se introdujo un electrodo auxiliar de radiofrecuencia con el objeto de repartir el haz en el tiempo y se cambió la fuente de iones. Estas modificaciones permitieron disponer de un haz externo de deuterones con corriente diez veces mayor que la obtenida en 1957 y estudiar, por ejemplo, reacciones del tipo $(d, {}^6\text{Li})$ de muy baja sección eficaz.

A partir de 1974 se dispuso de un haz externo de partículas α , que permitió realizar experiencias del tipo (α, xn) en las que la baja resolución del Sincrociclotrón es compensada por la del sistema de detección.

La máquina es utilizada también con fines de producción de radioisótopos y para trabajos de investigación en biología.

Desde su instalación en 1953 y hasta 1966, el acelerador en cascadas fue poco usado en experiencias de Física Nuclear. Ello se debió a su baja energía de aceleración (~ 1 MeV) que no permite usarlo en estudios de reacciones directas. Actualmente, el acelerador en cascadas es usado como fuente de neutrones mediante la reacción ${}^7\text{Li}(d, n){}^8\text{Be}$, para el estudio de isótopos alejados de la línea de estabilidad. Estos neutrones, una vez termalizados, producen fisión en una muestra de ${}^{235}\text{U}$. Los productos de fisión se difunden en la muestra y llegan a la fuente de iones de un separador de isótopos de alta eficiencia y resolución, construido íntegramente en la Argentina. Una de las masas separadas es recogida frente a los distintos detectores que analizan las radiaciones emitidas. El equipo para el procesamiento de la información es muy elaborado. No existió otro similar en Latinoamérica hasta que se instaló el Pelletrón de San Pablo, Brasil. Parte del mismo

es también usado en combinación con los equipos de detección del Sincrociclotrón.

La realización del proyecto IALE (Isótopos Alejados de la Línea de Estabilidad) fue decidida a mediados de 1966. A principios de 1968 se probó con éxito el nuevo separador. La obra civil y las reformas al acelerador en cascadas sólo estuvieron listas en 1968. A fines de 1969 y comienzos de 1970 se obtuvieron los datos correspondientes al ^{134m}I , que fueron objeto de la primera publicación del proyecto IALE. A partir de esa fecha, la producción científica del grupo puede ser comparada favorablemente con la de otros proyectos similares que se iniciaron aproximadamente en la misma época en distintos laboratorios europeos y norteamericanos.

Otras máquinas y equipos montados durante los primeros años de la actividad nuclear en la Argentina (calutrón, diversos espectrómetros beta, etc.) no dieron lugar a resultados igualmente significativos. Lo mismo puede decirse de la investigación nuclear en otros centros del país, que fue abandonada o que hoy en día no ofrece ninguna perspectiva alentadora. La existencia y el rendimiento demostrado por las dos líneas de trabajo mencionadas en primer lugar (Sincrociclotrón y Proyecto IALE) permite concluir:

- (a) Está demostrada la capacidad de los grupos nucleares experimentales de la CNEA para llevar a cabo investigaciones en Física Nuclear. Estas requieren una organización compleja y una planificación y continuidad de varios años.
- (b) Igualmente se ha puesto de manifiesto la solidez del grupo de apoyo electrónico y electromecánico, que asegura el funcionamiento de prácticamente cualquier máquina que se compre y que haya sido probada con anterioridad. Deben mencionarse importantes trabajos de electrónica nuclear realizados en torno a los dos aceleradores.
- (c) La capacidad de la Comisión Nacional de Energía Atómica para encarar problemas de esta magnitud para lo cual es imprescindible, además del interés de sus autoridades, la existencia de una infraestructura única en el país. Dicha infraestructura comprende mecanismos de compra, presupuestos, biblioteca y demás servicios auxiliares.

Además de los grupos experimentales anteriormente mencionados, existe un grupo de Física Teórica que desde los años 1968-1969, produce trabajos en forma sistemática. Se ocupa especialmente de problemas relacionados con la interrelación entre movimientos nucleares colectivos y de partícula independiente y de reacciones nucleares. Trabaja en estrecha colaboración con el Instituto Niels Bohr de Copenhague, Dinamarca. Este grupo teórico está en condiciones de dar un apoyo de excelente nivel a los grupos experimentales

que trabajen alrededor de una nueva máquina, siempre que el acceso a una computadora suficientemente grande esté asegurado.

III. EVOLUCION DE LAS MAQUINAS ACCELERADORAS DE PARTICULAS

III.1 Generalidades

El uso de máquinas aceleradoras de partículas como instrumentos destinados al estudio de la ciencia nuclear se inició en el año 1932: en esa época Cockcroft y Walton publicaron una descripción de su acelerador de protones de 600 keV instalado en el Cavendish Laboratory de Cambridge, Inglaterra e inmediatamente -en el mismo año- dieron a conocer los resultados experimentales de la reacción ${}^7\text{Li}(p,\alpha){}^4\text{He}$, confirmados y extendidos pocos meses más tarde con los trabajos realizados por Lawrence y sus colaboradores en Berkeley, E.E.U.U., con el primer ciclotrón de protones de 1 MeV. En un comienzo los únicos proyectiles acelerados eran protones, deuterones y partículas α y la mayoría de los conocimientos actuales en Física Nuclear han sido adquiridos observando reacciones nucleares inducidas por estos iones livianos; pero ya antes del fin de la primera década de exitosos experimentos se concibió la idea de utilizar como proyectiles iones más pesados que el ${}^4\text{He}$ y su importancia fue reconocida para el estudio de los fenómenos nucleares. Las investigaciones que pueden ser realizadas dependen fundamentalmente de la masa y energía de las partículas aceleradas y actualmente existe un importante número de ideas fundamentales para la ciencia nuclear, cuya realización implica la disponibilidad de facilidades cada vez más perfeccionadas y que a menudo exigen la aceleración de iones con masas comprendidas entre las del Carbono y el Uranio. En 1940, Alvarez y Tobías iniciaron trabajos en el Ciclotrón de 37" de Berkeley y demostraron que podían ser acelerados iones de C^{6+} a una energía de 50 MeV, pero recién en 1950 se observaron las primeras reacciones inducidas por iones pesados con haces de 10^5 partículas/segundo de C^{6+} de 120 MeV, realizadas en el ciclotrón de 60" de Berkeley. Sin embargo, y a pesar de su importancia, estos desarrollos no satisfacían aún las necesidades requeridas por los trabajos de investigación nuclear, debido principalmente a la gran dispersión en energías y a la baja intensidad de los haces obtenidos.

Los trabajos necesarios para lograr la aceleración de iones pesados con máquinas existentes, llevó a importantes modificaciones realizadas a lo largo de dos décadas en los ciclotrones de grandes laboratorios. Paralelamente se realizaron investigaciones tendientes a modificar los aceleradores lineales para ser usados con iones pesados y así fueron construídos los HILACS de Berkeley y Yale y, con algunas diferencias de diseño, los de Manchester y Kharkov.

Las máquinas electrostáticas fueron también usadas para la aceleración de iones pesados: los primeros trabajos se realizaron en Saclay y en las Universidades de Minnesota y Chicago, especialmente con iones de Li para estudiar elementos livianos. Finalmente con la construcción de los aceleradores Van de Graaff en tandem en 1958, fue posible acelerar iones más pesados que el Li a energías de interés para los trabajos de Física Nuclear y que respondían a las condiciones requeridas por las técnicas experimentales. El primer trabajo con iones pesados usando un acelerador en tandem fue realizado en Chalk River, Canadá, en 1958.

En las últimas dos décadas los progresos tecnológicos en la ciencia de los materiales, la electrónica y la ingeniería nucleares han impulsado un desarrollo sin precedentes en la tecnología de los aceleradores de partículas que, si bien no satisfacen completamente las demandas siempre crecientes de la ciencia nuclear y de todas las otras disciplinas a las que se ha extendido y generalizado el uso de aceleradores -física del estado sólido, metalurgia, reactores nucleares, química, biología, etc.- proporcionan una herramienta de investigación de insuperable valor para el progreso de la ciencia y de la tecnología.

Actualmente los aceleradores de iones pesados se han desarrollado en tres líneas diferentes: los ciclotrones isócronos a energía variable, los tandem Van de Graaff y los aceleradores lineales (Hilacs), existiendo además proyectos en los cuales se acoplan diferentes tipos de máquinas explotando las características más importantes de cada una de ellas.

Para dar una idea de la distribución actual de las máquinas aceleradoras, se hará una somera descripción de los principios elementales de su funcionamiento, dejando para los capítulos siguientes una descripción más detallada de las máquinas electrostáticas tipo tandem Van de Graaff y su comparación con los ciclotrones isócronos.

III.2. Ciclotrones

III.2.1 Ciclotrones de frecuencia fija. El principio de funcionamiento del ciclotrón convencional, es el hecho de que una partícula cargada que gira en un campo magnético necesita el mismo tiempo para cumplir una revolución, independientemente del radio de la órbita y de la energía y que ese tiempo sólo depende de la intensidad de campo magnético y de la carga y masa de la partícula. A medida que va incrementándose la energía entregada por un campo eléctrico alterno de frecuencia fija, la masa de la partícula

aumenta por efecto relativista y eso hace que el tiempo de revolución también crezca; consecuentemente las partículas comienzan a quedar fuera de sincronismo y se va haciendo cada vez más difícil y eventualmente imposible continuar acelerándolas.

III.2.2 Sincrociclotrón. Para acelerar los iones a energías mayores se ha desarrollado el ciclotrón de frecuencia modulada o sincrociclotrón, en el que la frecuencia de variación del campo eléctrico disminuye en forma sincrónica, compensando el aumento relativista de la masa de las partículas.

III.2.3 Ciclotrón Isócrono. En los últimos años se ha desarrollado otro método para compensar la falta de sincronismo de las partículas. Este principio tiene la ventaja de permitir la variación de la energía final alcanzada, mientras que los tipos anteriores son de energía fija. El método consiste en aumentar el campo magnético con el radio de las órbitas de manera de compensar exactamente el efecto relativista. Las partículas pueden ser así aceleradas a frecuencia constante tal como en los primeros ciclotrones. Sin embargo cuando las partículas se mueven en un campo magnético que crece con el radio, se dispersan rápidamente y hay que proporcionar un sistema para enfocarlas. Esto se realiza dividiendo las piezas polares del electroimán en regiones o sectores alternados de campo magnético intenso y de campo débil; por esta razón el ciclotrón isócrono es también llamado "de enfoque por sectores". Se puede aumentar aún más la fuerza de enfoque haciendo que los sectores radiales en que quedan divididas las piezas polares tengan bordes en forma de espiral. El ciclotrón isócrono tiene así ventajas de los dos tipos anteriores: la elevada intensidad de corriente del ciclotrón convencional y la alta energía del sincrociclotrón.

III.3. Aceleradores lineales (HILACS). En estas máquinas las partículas son aceleradas en línea recta mediante un campo eléctrico oscilante. Las estructuras utilizadas son muy variables pero todas ellas tienen la característica común de que la configuración de campo eléctrico incluye una onda progresiva cuya velocidad de fase es la misma que la velocidad de la partícula acelerada. Estas máquinas proveen un haz con excelente coimación pero con una dispersión en energías que puede ser del orden del 1%. Los aceleradores lineales para iones pesados (HILACS) han servido durante muchos años para la realización de importantes trabajos, pero con el interés creciente en la aceleración de iones situados en la región $A > 40$, las máquinas existentes de este tipo han dejado de ser adecuadas. Se han hecho varias propuestas para la construcción de nuevos aceleradores lineales o la

modificación de los ya en operación; ellos están pensados para acelerar iones situados en la región del Uranio, pero el éxito de estos modernos Super Hilacs está aún por ser comprobado.

III.4. Máquinas Electrostáticas. En su forma actual más elaborada se encuentran descritas en los capítulos siguientes. Históricamente las máquinas electrostáticas han desempeñado un importante papel en el desarrollo de la Física Nuclear. Durante el período 1948-1952, la experiencia acumulada en la construcción de los aceleradores Van de Graaff posibilitó el desarrollo de dos máquinas para iones positivos, una en el MIT y otra en Los Alamos Scientific Lab; el proyecto original pretendía llegar a 12 MV en el terminal: la máquina del MIT alcanzó un límite operacional situado en el rango 8-9 MV y fue el prototipo construido por la High Voltage Eng. Corp. para la construcción de veintiséis aceleradores tipo HVEC-CN cuya ubicación se muestra en la tabla III.1

El advenimiento de las fuentes de iones negativos posibilitó el desarrollo de los aceleradores en tandem, el primero de los cuales, de 5 MV, fue comenzado a construir por la HVEC en 1954 e instalado en Chalk River en 1958. La serie HVEC-EN, cuya distribución se muestra en la tabla III.2, ha demostrado poseer cualidades sobresalientes como máquina de precisión para el desarrollo de la Física Nuclear. Paralelamente con la HVEC, la Metropolitan Vickers Electr. Co instaló dos máquinas similares en Harwell y Aldermaston, Inglaterra; en 1965 se construyeron los aceleradores de las Universidades de Tokio y Kyoto por las compañías Toshiba y Mitsubishi respectivamente y en el período 1965-68 se desarrolló en la Unión Soviética el EGP-10 por el D. V. Efremov Scientific Institute of Electrophysical Apparatus.

A pesar de que esta clase HVEC-EN de aceleradores electrostáticos significó un importante progreso para la ciencia nuclear, fue claro desde un comienzo que la máxima energía de protones alcanzable estaba por debajo de la barrera Coulombiana correspondiente a los elementos más pesados y que, por consiguiente, estos quedaban excluidos de los estudios de precisión que caracterizaban a los tandem. Ello condujo naturalmente a la producción de máquinas que alcanzaran un mayor voltaje: los HVEC-FN inicialmente proyectados para llegar a 7.5 MV y más recientemente a 9.0 MV. El diseño continuó siendo similar a los HVEC-EN y sólo sus dimensiones fueron aumentadas; el primer acelerador de este tipo fue entregado en Los Alamos en 1963 y su distribución posterior se muestra en la tabla III.3.

La demanda siempre creciente de máquinas más poderosas y que a la vez

permitiesen la instalación de varios tipos de fuentes de iones especializadas, llevó al desarrollo de los modelos Emperor MP, sucesores de los FN. Dos de ellos fueron ordenados a la HVEC por la U.S. Atomic Energy Commission en 1962, el primero de los cuales se instaló en la Universidad de Yale en 1965. Estos aceleradores con un terminal a 10 MV fueron posibles como consecuencia del diseño de tubos de aceleración con campo inclinado que permitió eliminar las dificultades encontradas anteriormente. El acelerador de la Universidad de Yale ha operado eficientemente a 11.75 MV y en principio podría ser llevado a 17 MV, condiciones limitadas por la geometría utilizada en la construcción del tanque. La tabla III.4 muestra la ubicación de las máquinas HVEC-MP.

De acuerdo a las publicaciones, el acelerador EGP-20 de la Unión Soviética y el tandem de la Universidad de Kyushu en Japón, ambos en etapa de construcción, tendrían características similares a las del modelo HVEC-MP.

A partir del Emperor MP se ha desarrollado el HVEC-XTU capaz de alcanzar los 20 MV en el terminal; la estructura de la columna y su longitud son iguales a las anteriores habiéndose modificado la geometría y dimensiones del tanque y, a consecuencia de ello, el tipo de gas usado como aislante. Esta máquina está en su etapa de instalación en el Laboratorio de Legnaro (Padua, Italia).

Una solución alternativa para la construcción de aceleradores electrostáticos de alto voltaje ha sido ideada por la National Electrostatics Corp. (NEC) fundada en 1965. Sus diseños están basados en la modularidad de las columnas y del tubo de aceleración, siendo en principio posible lograr diferentes tensiones en el terminal mediante el agregado de módulos idénticos a razón de una unidad por MV. Este tipo de construcción presenta importantes ventajas en lo referente a reemplazo de elementos y facilidad de manobras; la disminución de costos que implicaría una fabricación modular en serie, está compensada por la alta calidad de los materiales empleados y la tecnología involucrada. La segunda innovación introducida por la NEC ha sido el reemplazo de las cintas de transporte de cargas por las denominadas cadenas Pelletrón. La primera máquina de este tipo, modelo 8UD, fue instalada en la Universidad de São Paulo, Brasil en 1970. La tabla III.5 muestra la distribución de este tipo de aceleradores.

El último desarrollo en el campo de las máquinas electrostáticas lo constituye el proyecto iniciado en 1972 en el Daresbury Research Lab. conjuntamente con otros centros de Investigación de Inglaterra y un convenio con la HVEC. Este acelerador está proyectado para alcanzar 30 MV; sus innovaciones incluyen un nuevo sistema de transporte denominado Laddertron que

posibilitaría una mayor capacidad de corriente de carga. Actualmente se encuentra en etapa de construcción y es evidente que sus resultados tendrán importantes implicaciones para el futuro de los aceleradores electrostáticos.

III.5. Combinaciones de distintas máquinas. La demanda para lograr un espectro completo de iones acelerados a altas energías ha llevado a una revisión de los métodos utilizados hasta el presente. En muchos laboratorios de avanzada se ha llegado a la conclusión de que la combinación de un acelerador electrostático tipo tandem Van de Graaff como sistema inyector de un ciclotrón isócrono daría la mejor y más versátil de las performances compatible con los elevados costos involucrados. En el estado actual de la tecnología de aceleradores de partículas, son varias las posibilidades existentes para cubrir toda la extensión de la tabla periódica y no es aventurado pensar que métodos de avanzada -Linacs superconductores, intercambio de carga, super fuentes de iones- puedan constituir en un futuro próximo, soluciones más directas.

La tabla III.6 muestra un resumen de los proyectos y propuestas de instalación de combinaciones de aceleradores de iones pesados.

III.6. Análisis comparativo. En las figuras III.1 y III.2 se examinan en forma comparativa las capacidades de los distintos aceleradores de iones pesados; ellos muestran, en forma separada, las perspectivas que se presentan en E.E.U.U. y Europa respectivamente. Las máquinas están agrupadas en cuatro categorías: según estén en operación, en construcción, como proyecto propuesto o meramente hipotéticos y tienen como referencia dos barreras Coulombianas: una calculada para un blanco de Uranio y proyectil indicado en la escala de abscisas y otra para blanco con masa igual a la del proyectil. La escala de ordenadas E/A indica la máxima energía alcanzable por nucleón, medida en MeV/AMU, para los iones de masa A indicados en la escala de abscisas.

En la figura III.1 puede observarse que, entre las máquinas en operación -HILACS, ciclotrones y tandems MP- los iones que pueden ser acelerados a una energía superior a la de la barrera coulombiana están limitados al Ar, Si, B y Fe (con algunas restricciones los tandem MP pueden llegar hasta el Fe). Entre las máquinas en etapa de construcción o experimental, se encuentra el ciclotrón de la Universidad de Indiana, no planeado originalmente como acelerador de iones pesados pero que con ciertas modificaciones podría convertirse en una importante facilidad y el Super HILAC que, en

perspectiva, estaría capacitado para acelerar todo tipo de iones hasta una energía de 8.5 MeV/AMU. Las curvas superiores muestran las condiciones aproximadas de las propuestas de sistemas tandem-ciclotrón para el Argonne National Lab. y Oak Ridge National Lab.: tienen la característica sobresaliente del alto valor de E/A que puede ser alcanzado a medida que decrece A , consecuencia lógica de la carga q/A obtenible mediante proceso de stripping para iones livianos. Las curvas hipotéticas muestran la potencialidad de los super-tandem, entendiendo por tales aquellos que llegarían a 50 MV en el terminal; aún con 30 MV (Daresbury) se alcanza a acelerar una masa de 160 u a una energía de 6 MeV/AMU. También se indica como hipotética la combinación Ciclotrón de Indiana-tandem MP.

La figura III.2 muestra el mismo tipo de análisis para la situación en Europa. Las características del ciclotrón de Dubna 4.0 m pueden ser modificadas favorablemente según sea el tipo de fuente de iones utilizada. El UNILAC está en etapa de construcción en Wixhausen (Darmstadt): es un acelerador lineal con características excepcionales en sus capacidades de variación de energía y variedad de partículas; el proyecto ALICE en Orsay, Francia, es el primer ejemplo de acelerador lineal como inyector de un ciclotrón isócrono: en su etapa inicial ha alcanzado 10^8 partículas/segundo de K^+ a una energía de 400 MeV. En etapa de construcción se muestra la performance teórica del tandem de 30 MV de Daresbury Research Lab. El más ambicioso proyecto lo constituye el complejo GANIL (Francia) compuesto por un ciclotrón compacto inyector de un sistema de dos ciclotrones a sectores.

Es de hacer notar que esta intensa actividad europea caracterizada por la diversidad de métodos de aceleración empleados es, en general, el resultado de los esfuerzos conjuntos de muchos laboratorios.

Las consideraciones anteriores resumen en forma sintética el estado actual de la tecnología y las tendencias en materia de aceleradores para iones pesados. En las Figs. III.1 y III.2 puede observarse una propensión a cubrir la zona situada arriba de la barrera Coulombiana, con proyectiles pesados; de su análisis no es posible extraer una conclusión decisiva para la opción por un determinado tipo de acelerador, que deberá hacerse en base a otras consideraciones que tengan en cuenta el detalle de sus características y su adecuación a los problemas que se desean estudiar.

Dejando aparte los proyectos de avanzada, limitados por obvias razones económicas, es interesante considerar el progreso realizado en las ciencias nucleares utilizando facilidades menos sofisticadas, tomando como parámetro

de evaluación arbitrario el número de trabajos publicados entre los años 1955-1974 (abstracts de la A.P.S.). Si bien no es posible señalar una razón determinante para la evolución que se muestra en la Fig. III.3, es dable pensar que, a medida que sea posible seguir aumentando los potenciales de los terminales y el tamaño de los aceleradores tandem o que el progreso tecnológico resuelva el problema de los llamados "folded tandem", la tendencia señalada continuará aumentando, indicando una tácita preferencia por los aceleradores electrostáticos.

Tabla III.1Aceleradores HVEC-CN

Número de serie	Ubicación	Fecha de entrega
C-1	Oak Ridge National Laboratory	5/51
C-2	Rice University	4/53
C-3	Columbia University	6/55
C-4	Imperial College of Science & Technology	10/55
C-5	Atomic Weapons Research Est., Inglaterra	6/56
C-6	University of Strasbourg, Francia	11/56
C-7	Pennsylvania State University	9/57
C-8	Atomic Energy Establishment, India	6/58
C-9	University of Freiburg, Alemania	7/58
C-10	Atomic Energy Commission, Suecia	1/65
C-11	University of Zurich, Suiza	8/59
C-12	University of Frankfurt, Alemania	2/61
C-13	University of Padua, Italia	4/61
C-14	Japan Atomic Energy Research Institute	11/61
C-15	University of Laval, Quebec	4/62
C-16	University of Texas, Austin	3/63
C-17	Southern Universities Nuclear Inst., S.Africa	2/63
C-18	State University of Iowa	8/63
C-19	Ohio State University	6/62
C-20	University of Alberta, Canada	4/64
C-21	Hahn-Meitner Institute, Alemania	10/65
C-22	University of Virginia	12/64
C-23	University of Kentucky	7/63
C-24	Lowell Institute of Technology	7/64
C-25	Institute of Nuclear Energy Research, Taiwan	6/68
C-26	University of Arizona	6/66

Tabla III.2Aceleradores HVEC-EN

Número de serie	Ubicación	Fecha de entrega
E-1	University of Montreal	9/58
E-2	University of Wisconsin	6/59
E-3	Florida State University	8/59
E-4	California Institute of Technology	1/60
E-5	Australian National University	2/60
E-6	Eidg. Technische Hochschule, Zurich	9/60
E-7	Max-Planck Institut für Kernphysik, Alemania	5/61
E-8	Niels Bohr Institute, Copenhagen	5/61
E-9	University of Liverpool	5/61
E-10	Rice Institute	6/61
E-11	Argonne National Laboratory	6/61
E-12	Oak Ridge National Laboratory	6/61
E-14	University of Pennsylvania	2/62
E-15	University of Texas	11/62
E-16	Centre D'Etudes Nucléaires, Saclay, Francia	11/62
E-17	University of Erlangen	6/66
E-18	University of Oxford	7/63
E-19	Département Atomique Militaire, Francia	7/63
E-20	University of Pittsburgh	11/63
E-21	Weizmann Institute of Science, Israel	12/62
E-22	University of Pittsburgh	11/63
E-23	Comisión Nacional de Energía Nuclear, México	3/68
E-24	University of Utrecht, Holanda	1967
E-25	University of Western Michigan	3/69
E-26	University of Uppsala, Suecia	8/68
E-27	Kansas State University	3/69
E-28	University of California, Livermore	3/71
E-29	University of Aarhus, Dinamarca	1972
E-30	University of the Witwatersrand, S.Africa	1973

Tabla III.3Aceleradores HVEC-FN

Número de serie	Ubicación	Fecha de entrega
FN-1	Rutgers, The State University, Nueva Jersey	12/63
FN-2	Los Alamos Scientific Laboratory	10/63
FN-3	University of Washington	12/63
FN-4	Stanford University	8/64
FN-5	University of Washington	11/64
FN-6	Edgewood Arsenal	11/65
FN-7	University of Cologne	12/66
FN-8	State University, Stony Brook, Nueva York	8/67
FN-9	McMaster University	9/67
FN-10	Duke University	9/68
FN-11	Argonne National Laboratory	6/67
FN-12	Notre Dame University	2/68
FN-13	Purdue University	9/68
FN-14	Centre d'Etudes Nucléaires, Saclay, Francia	3/69
FN-15	Institut de Physique Atomique, Rumania	1/71
FN-16	Niels Bohr Institute, Copenhagen	10/69
FN-17	Florida State University	

Tabla III.4Aceleradores HVEC-MP

Número de serie	Ubicación	Fecha de entrega
M-1	Yale University	3/65
M-2	University of Minnesota	7/65
M-3	Atomic Energy of Canada, Ltd.	8/65
M-4	University of Rochester	8/66
M-5	Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg	7/67
M-6	Brookhaven National Laboratory	10/69
M-7	Brookhaven National Laboratory	10/69
M-8	University of Munich	5/70
M-9	Institute of Physics, Orsay, Francia	1973
M-10	University of Strasbourg, Francia	1973

Tabla III.5Aceleradores NEC para Iones Pesados*

2UH-2 MEV PROTONES

Chalk River Nuclear Laboratories

Chalk River, Ontario, Canadá

2UDH-4MEV PROTONES

Battelle Pacific Northwest Laboratories

Richland, Washington

3UH-HC-3 MEV IONES PESADOS

Tokio Institute of Technology

Tokio, Japón

4U INTO 8UD-22 MEV PROTONES

(3 etapas)

University of Sao Paulo

Sao Paulo, Brasil

12UD-24 MEV PROTONES

Tsukuba University

Tsukuba, Japón

14UD-28 MEV PROTONES

The Australian National University

Canberra, Australia

14UD-28 MEV PROTONES

The Weizmann Institute of Science

Rehovot, Israel

* Las energías están dadas para protones para facilitar la comparación.

Tabla III.6

Aceleración de Iones Pesados

PROYECTOS DE CICLOTRONES ISOCRONOS CON INYECTORES

Ubicación	Estado	Energía y Partícula (MeV/u)	Ciclotrón	Inyector
Argonne	Propuesta	350 p ; 10 U	6-sectores	TU tandem
Bohr Institute	Estudio			
Brookhaven	Propuesta	50 p ; 5 U	4-sec(Ind)	2 MP tandems
Carnegie-Mellon	Estudio	20 U	conversión, fm	linac
Florida State	Estudio	7.5 U	6-sec (MSU)	FN, MP tandem
Indiana University	Estudio		4-sectores	tandem
Karlsruhe	Estudio			
Los Alamos	Propuesta	100 p ; 6 U	4-sec (Ind)	FN tandem
Michigan State	Propuesta	600 p ; 9.0 U	6-sectores	ciclotrón o tand.
Oak Ridge	Propuesta	300 p ; 7.5 U	4-sectores	TU tandem
UCLA-Group	Estudio		4-sectores	ciclotrón-2 gaps
U Maryland	Estudio	10 U	4-sectores	tandem + 4-sec
U Rochester	Propuesta	6 U	4-sec (Ind)	MP tandem
GANIL	Propuesta	100-4	2 cicl 4-sec	ciclotrón

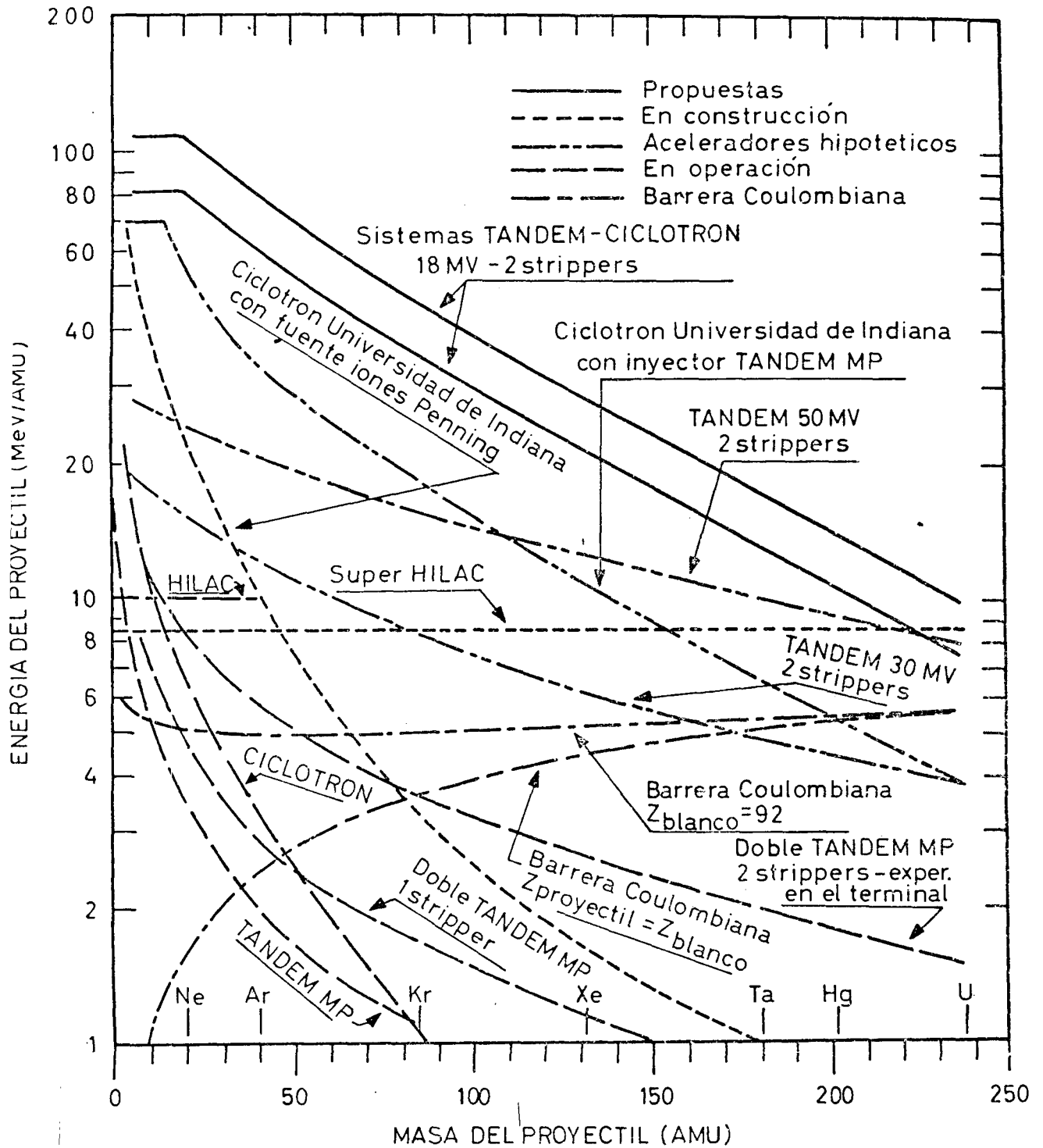


Fig. III.1 Situación actual y perspectivas que se presentan en E.E.U.U.

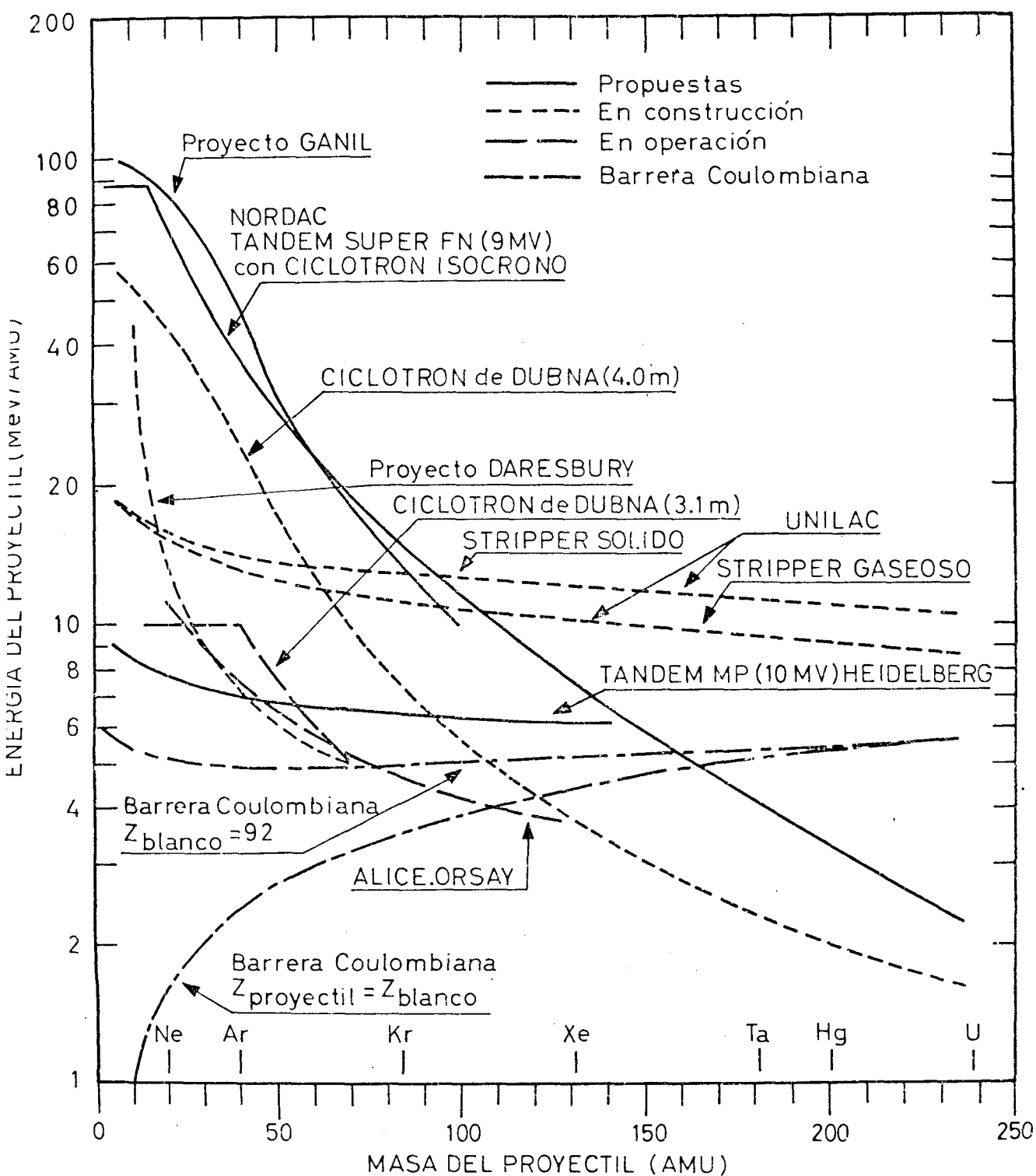


Fig. III.2 Situación actual y perspectivas que se presentan en Europa.

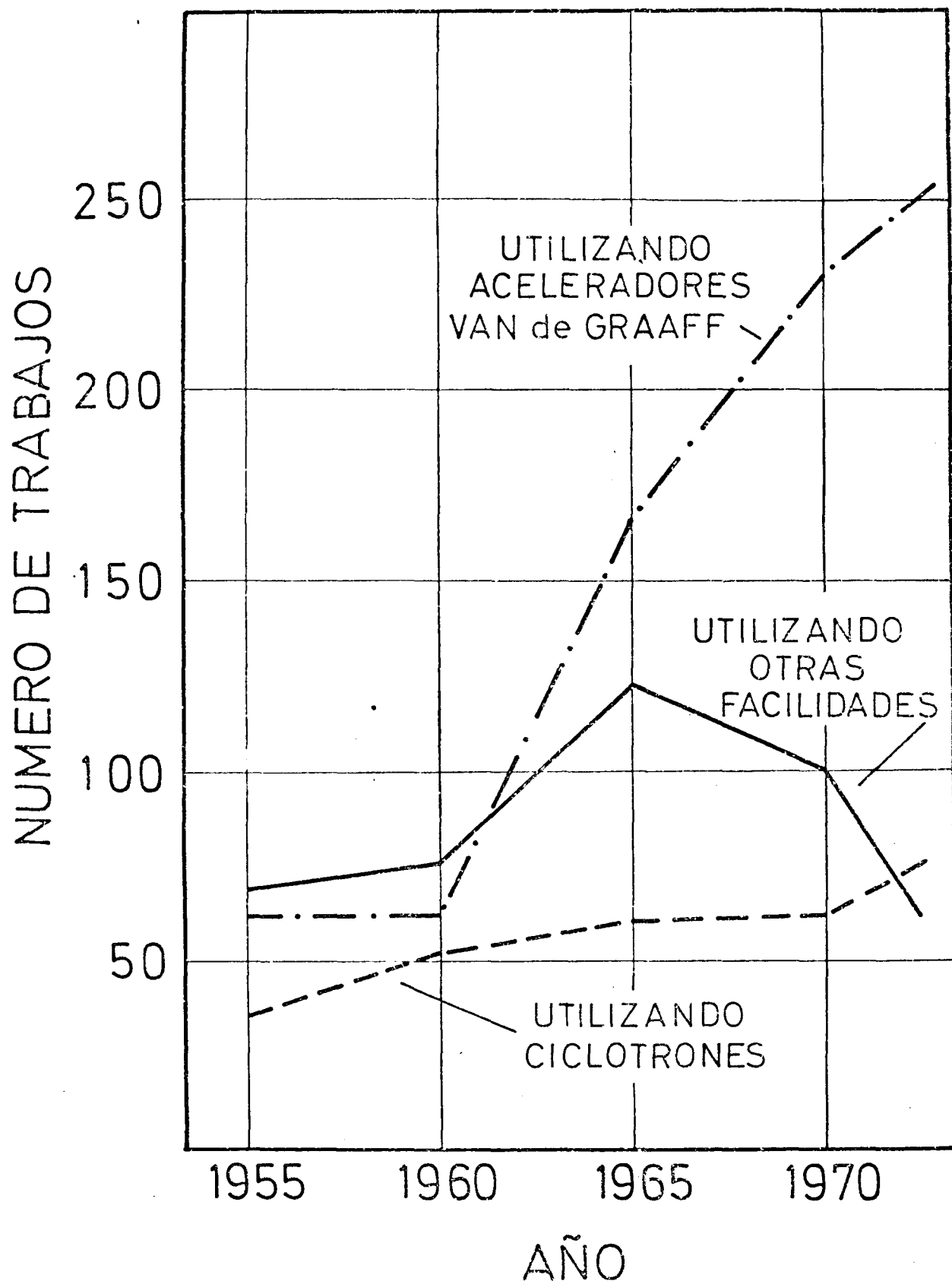


Fig. III.3 Número de trabajos publicados en física nuclear, en función del tipo de máquina utilizada. (Abstracts de la A.P.S.; años 1955-1974).

IV. DESCRIPCION ESQUEMATICA DE UN ACELERADOR ELECTROSTATICO

Describiremos en este capítulo una instalación típica de un acelerador electrostático tipo Van de Graaff operando en modo tandem.

IV.1. Consideraciones Generales

Para realizar estudios en Física Nuclear y en otros variados temas de la física básica y aplicada, se requiere que los haces provistos por los aceleradores cumplan con las siguientes características:

(a) Posibilidad de variar el tipo de partícula.

Los distintos tipos de partículas producen diferentes procesos al interactuar con la materia, proporcionando en cada caso un tipo particular de información. Recientemente se ha extendido en física nuclear el empleo de iones pesados que permiten alcanzar estados nucleares excitados en un gran número de nucleídos hasta ahora no accesibles.

(b) Energía variable.

Además del tipo de partícula, es conveniente poder variar la energía de las mismas, ya que los diferentes procesos posibles con una determinada partícula se presentan con distintas probabilidades que dependen fundamentalmente de la energía. En la mayoría de los trabajos es importante que la energía del haz pueda ser variada con continuidad y rapidez y que su valor sea conocido con precisión.

(c) Pequeña dispersión de energía.

En muchos procesos físicos se presentan situaciones -resonancias, niveles de energía muy próximos entre sí- que resultan observables sólo cuando se realizan los experimentos con haces de partículas esencialmente monoenergéticos. Si la dispersión en energía es grande se producen simultáneamente diferentes procesos que interfieren y entorpecen o imposibilitan su interpretación.

(d) Pequeña emitancia.

Este término es usado para designar la tendencia de las partículas de un haz de determinada energía a diverger con respecto a la dirección deseada de propagación.

Un haz que posee emitancia es más fácil de ser transportado y permite, en general, la realización de experimentos de mejor calidad.

(e) Estructura temporal versátil.

La estructura temporal más conveniente del haz de partículas depende fuertemente del experimento que se realice. En muchos casos

puede convenir la irradiación mediante un haz continuo, en el que no existe ningún tipo de interrupción o pulsado. En otros experimentos puede ser necesario producir un determinado proceso cuyos efectos deben ser observados a posteriori, para lo cual es conveniente que el haz posea una estructura discontinua en forma de pulsos de determinada longitud y separación.

IV.2. Acelerador Van de Graaff.

Esta máquina consiste fundamentalmente en un terminal de alta tensión (1 a 20 millones de Volts) instalado en el interior de un tanque lleno de gas aislante. El terminal de alta tensión (positivo) y el extremo a potencial de tierra están conectados por un tubo (tubo de aceleración) dentro del cual se efectúa un vacío elevado.

En la versión de acelerador de etapa simple, una fuente de iones instalada dentro del terminal de alta tensión genera las partículas cargadas positivamente que, por influencia del campo electrostático, son aceleradas en el interior del tubo hacia el potencial de tierra donde son extraídas de la máquina para ser utilizadas.

En la operación en modo tandem, la fuente de iones está situada en uno de los extremos del tubo de aceleración, ambos colocados a potencial de tierra. Los iones, ahora cargados negativamente, son acelerados hacia el terminal de alta tensión positiva, situado en la parte central del tubo de aceleración; en esa región las partículas son despojadas de un cierto número de electrones y se convierten en iones positivos que son nuevamente acelerados hacia el otro extremo del tubo, a potencial de tierra, donde son utilizados.

IV.3. Componentes del Acelerador.

IV.3.1 Generador de alta tensión tipo Van de Graaff. Se basa en la transferencia de carga desde un generador hacia un terminal de alta tensión, que es transportada mediante una correa o cadena sin fin. Las cargas son depositadas en la correa y luego colectadas mediante grupos de electrodos situados en la proximidad de la misma.

Recientemente ha sido introducido un nuevo sistema de transporte de cargas que se basa en una cadena de elementos metálicos separados por aisladores (pellettrón). Se estima que este nuevo método permitirá duplicar y hasta triplicar el máximo potencial a que será posible cargar el terminal de alta tensión.

IV.3.2 Sistema de inyección de iones. Produce un intenso haz de iones

negativos que es dirigido hacia la entrada del tubo de aceleración. Se emplean usualmente dos tipos de fuente de iones, generalmente provistas como equipo standard:

Fuente de iones tipo "duoplasmatron". Produce iones negativos por un proceso de intercambio de carga, a partir de un haz de iones positivos. Para esto se induce un plasma por medio de un arco eléctrico; los iones positivos resultantes son transferidos a un canal, donde se les agregan electrones por procesos de colisión. Esta fuente es especialmente apta para producir iones de sustancias en estado gaseoso.

Fuente de "sputtering" para iones pesados. Esta fuente se basa en la producción directa de iones negativos de una amplia gama de sustancias sólidas o gaseosas, por el bombardeo mediante un haz de electrones o iones pesados.

IV.3.3 Sistema inyector. Es un conjunto de equipos tales como fuentes de tensión, imanes y elementos constituyentes de la óptica del sistema de transporte, necesarios para introducir los iones en el acelerador con la dirección y emitancia requeridas.

IV.3.4 Tanque del acelerador. Contiene los elementos del generador de Van de Graaff y el medio aislador gaseoso apropiado para soportar los elevados potenciales producidos. Varios gases son usados con este propósito dependiendo del voltaje máximo de operación de la máquina, entre ellos puede mencionarse a los siguientes: N_2 , CO_2 , SF_6 , etc. La presión de trabajo varía entre 10 y 15 atm., según sea el voltaje del terminal de alta tensión.

IV.3.5 Columnas. El terminal de alta tensión es soportado por columnas aisladoras formadas por secciones aislantes con anillos equipotenciales. Generalmente contienen también resistores que distribuyen el voltaje en forma gradual para evitar gradientes demasiado elevados localizados en algunas secciones de las columnas.

IV.3.6 Generador de voltaje. Está formado por el inductor, cadena o correa de transmisión y peines colectores destinados a la generación y transporte de cargas.

IV.3.7 Estabilizador. La estabilización del potencial del terminal se realiza variando la carga que presenta al efecto corona establecido contra una punta colectora situada cerca del terminal.

IV.3.8 Tubos de aceleración. Están formados por anillos cerámicos aisladores separados por anillos metálicos que forman superficies equipotenciales y reparten el gradiente de tensión. El tubo de aceleración debe soportar la presión del gas aislador contra un elevado vacío efectuado en su interior para no obstaculizar el paso de los iones.

IV.3.9 Terminal de alta tensión. Incluye en su interior las poleas de la correa o cadena transportadora de carga y los canales de extracción de electrones. Además en muchos casos se incluye un generador eléctrico operado mediante el movimiento de la polea que permite disponer de potencia eléctrica aislada del potencial de tierra.

IV.3.10 Optica del haz. En el extremo de alta energía se instala una serie de elementos destinados a manejar el haz de partículas energéticas producidas por el acelerador, a fin de que éstas sean conducidas en forma adecuada al área experimental. Esos elementos consisten en equipos que producen campos eléctricos y magnéticos, estáticos o variables, capaces de modificar las trayectorias de las partículas cargadas.

Próximo a la salida del acelerador se instala un imán que defleca el haz y permite realizar un análisis de energía, es decir, eliminar del haz transmitido todas aquellas partículas que poseen energías distintas de la deseada.

A este imán le sigue un imán deflector multivía que dirige el haz de partículas selectivamente a cada una de las canalizaciones previstas que conducen al área experimental. Usualmente existen varias de estas áreas en una instalación, lo que permite la preparación de un determinado experimento mientras otro está en curso. Esta posibilidad brinda una gran flexibilidad de funcionamiento y un excelente aprovechamiento del acelerador.

A espacios regulares a lo largo de la línea del haz es necesario colocar grupos de cuadrupolos magnéticos a fin de corregir la divergencia de las partículas, evitar que éstas choquen con las paredes del tubo y para enfocar el haz en el blanco previsto.

IV.3.11 Sistema de pulsado. En numerosos estudios es necesario observar el efecto que un determinado proceso de bombardeo induce en una sustancia. Para ésto es imprescindible irradiar durante un corto período con el haz del acelerador y luego interrumpirlo con el fin de efectuar la medición sin perturbaciones.

El pulsado del haz se efectúa mediante un sistema especial que, en el caso de los aceleradores tandem, es particularmente simple: el haz pasa entre un par de placas paralelas alimentadas con una tensión oscilante de frecuencia variable. Por efecto del campo eléctrico alternado el haz resulta desviado hacia uno y otro lado de una ranura y sólo pasa a través de ella cuando atraviesa la región de las placas en un instante en que la tensión en ambas placas es igual. El haz resultante es pulsado y se puede variar arbitrariamente la duración de los pulsos y el ritmo de su repetición, de acuerdo al experimento que se realiza.

IV.3.12 Sistema de vacío. Está destinado a evacuar el aire contenido en el tubo de aceleración, fuente de iones, inyector y canalización conductora del haz. Debe ser un sistema elaborado, capaz de alcanzar el elevado grado de vacío requerido y permitir una rápida maniobra en el servicio del acelerador. Las bombas deben estar adecuadamente entrampadas para evitar contaminaciones en los elementos de la máquina. Debe existir un sistema de protección incluyendo válvulas de cierre automático para prevenir posibles accidentes en la línea del haz o en la fuente de iones.

IV.3.13 Control y protección. El acelerador se opera desde una consola ubicada en la sala de control; desde un recinto cercano y muchas veces comunicado con ella, se realiza la adquisición y el procesamiento de los datos provenientes de los experimentos en curso.

Los equipos de alta potencia o ruidosos, generadores, transformadores, relevadores, están generalmente ubicados en un recinto separado de la sala de control.

El personal que opera en la vecindad del acelerador debe ser protegido de las radiaciones ionizantes. Esto se obtiene mediante la implantación de las normas pertinentes de operación y mediante el empleo de sistemas automáticos de seguridad, que evitan que la máquina funcione en caso que las puertas no estén cerradas debidamente o que otros controles de protección no hayan sido cumplimentados.

IV.3.14 Almacenamiento y transferencia del gas. El sistema de almacenamiento y trasvasamiento permite extraer rápidamente el gas aislador del tanque del acelerador y almacenarlo durante su reparación o servicio. El sistema consiste en bombas compresoras y tanques de alta presión, con sus válvulas, tuberías y controles.

IV.4. Sistemas Accesorios

Conjuntamente con el acelerador debe contemplarse la instalación de equipos accesorios, imprescindibles para la realización de los experimentos y la operación efectiva del sistema.

Se enumeran a continuación los principales elementos que deben incluirse en la instalación del laboratorio del acelerador.

(a) Sistema de adquisición y procesamiento de la información proveniente de los detectores de radiaciones y de los demás elementos receptores de los datos experimentales.

(b) Cámara de dispersión para partículas cargadas que permite bombardear los diversos blancos con el haz del acelerador y posicionar en forma conveniente

los detectores de los productos de reacción.

(c) Cámara de reacción para radiación γ . Con requerimientos más simples que la mencionada en (b), permite alojar y posicionar el portablancos en condiciones de blindaje adecuadas para este tipo de experimentos. Los detectores se ubican en el exterior de la cámara.

(d) Sistemas de control del haz, instalados en cada una de las líneas, consistentes en cajas de Faraday para la integración y maximización de la corriente y en controles electrónicos de forma y posición (scanners) destinados a obtener un correcto centrado del haz en el blanco.

(e) Laboratorio de preparación de blancos por evaporación al vacío, electrodeposición, etc., con facilidades para manipulación de sustancias isotópicamente enriquecidas.

(f) Pequeño taller mecánico y electrónico para labores relacionadas con los experimentos en curso y servicio de las diversas partes de la máquina.

(g) Sistemas e instalaciones básicas de:

- (i) Distribución de aire comprimido para la actuación de válvulas, puertas y equipos de seguridad.
- (ii) Provisión y distribución de nitrógeno líquido.
- (iii) Seguridad para protección del personal.
- (iv) Generadores eléctricos auxiliares para casos de emergencia.

V. FACTORES DECISIVOS EN LA ELECCION DE UN ACCELERADOR ELECTROSTATICO

Los parámetros fundamentales que deben ser considerados en la elección de un acelerador son:

- (1) Energía máxima alcanzable por el haz de partículas
- (2) Intensidad de corriente máxima
- (3) Variedad de partículas posibles de acelerar
- (4) Definición de la energía de salida
- (5) Facilidad de operación
- (6) Costo

Como ha sido discutido en el capítulo anterior la elección queda esencialmente limitada a los dos tipos de máquinas que han llegado a un alto grado de perfeccionamiento en las últimas décadas: los ciclotrones isócronos y los aceleradores tandem Van de Graaff.

Con respecto al punto (1) referente a la energía máxima que se puede entregar a las partículas a acelerar, se encuentra que los ciclotrones isócronos permiten alcanzar valores mayores sólo para partículas livianas, siendo superados por los tandem en el caso de iones más pesados, por encima de la masa $A \sim 40$.

La Tabla V.1 ilustra esta propiedad para ambas máquinas.

Tabla V.1

Energía Máxima Alcanzable para Diferentes Iones

Ion	$E_{\max}$ (MeV)	
	Ciclotrón	Tandem (17 MV Terminal)
p	130	34
α	130	51
^{12}C	160	100
^{16}O	~ 200	100 - 150
^{40}Ar	80	100
^{79}Br	--	190
^{208}Pb	--	190

Cabe señalar que, en realidad, la aplicabilidad de energías altas para iones livianos es relativa. Es interesante constatar en este sentido, que la mayor parte de los trabajos realizados con ciclotrones isócronos en otros laboratorios no utilizan la energía máxima disponible. Los tandem son, por lo tanto, más ventajosos desde el punto de vista del parámetro energía máxima.

El punto (2) se refiere a la intensidad de corriente máxima alcanzable. La Tabla V.2 ilustra la comparación de ambas máquinas con respecto a esta característica.

Tabla V.2

Intensidad de Corriente de Haz Externo Máxima Alcanzable

Ion	$I_{\max}$ (μA)	
	Ciclotrón	Tandem
p	40	3
α	20	0.1
$^{12}_C$	1	0.5
$^{16}_O$	--	2.2
$^{79}_{Br}$	--	0.01
$^{208}_{Pb}$	--	0.002

Está claro que para iones livianos el ciclotrón supera holgadamente al tandem en cuanto a intensidad del haz externo. Si bien esta característica no representa un obstáculo de importancia para la mayoría de las investigaciones que pueden realizarse con haces de iones acelerados, sí limita la producción de radioisótopos muy activos.

El tercer aspecto a considerar es la variedad de partículas que pueden acelerarse en una y otra máquina. Esta es probablemente la característica que hace que el número de aceleradores Van de Graaff actualmente en operación sea sensiblemente mayor que el de ciclotrones. En censos realizados en E.E.U.U. se obtuvieron los guarismos que figuran en la Tabla V.3

Tabla V.3

Número de aceleradores en E.E.U.U.

Año del Censo	Ciclotrones	Aceleradores Van de Graaff
1969	31	83
1973	33	92

donde también se nota una leve diferencia en el incremento relativo en el número de máquinas a favor de los aceleradores Van de Graaff. La información actual indica que esta tendencia se ha acentuado en los últimos años.

En efecto, los ciclotrones están ordinariamente limitados a iones livianos, alcanzando dificultosamente masas del orden de $A \sim 40$, como en el caso de los iones de Ar. Por otro lado, los tandem Van de Graaff no tienen ningún tipo de limitación en este sentido; es posible acelerar con ellos iones de cualquier masa llegando hasta el más pesado de los elementos estables, el uranio. Es en este importante aspecto que los aceleradores Van de Graaff brindan posibilidades mucho más amplias que los ciclotrones.

En cuarto lugar hemos mencionado el factor de la definición de la energía de salida. A diferencia de los ciclotrones antiguos, las modernas máquinas isócronas permiten obtener haces con una definición de energía casi comparable a la obtenible en un acelerador Van de Graaff. Pero si bien la definición de la energía de salida es comparable en ambos tipos de máquina, los tandem son decididamente superiores en lo que se refiere a la obtención de un valor dado de energía, ya que es posible hacer variaciones finas de este parámetro (del orden de los keV).

El siguiente punto se refiere a la facilidad de operación. Hay muchas facetas en la operación de estas máquinas. Fundamentalmente, en forma global, se puede decir que los aceleradores Van de Graaff son más sencillos de operar debido a su principio de funcionamiento: se trata esencialmente de iones que son acelerados por la presencia de un campo eléctrico estático, los ciclotrones, en cambio, involucran una combinación de campo magnético con campo eléctrico variable a muy alta frecuencia y, para lograr su funcionamiento, debe ser alcanzada una situación crítica de sincronismo.

Pero hay además otros aspectos importantes, como por ejemplo la facilidad

de modificar la energía de un haz de partículas. En un ciclotrón isócrono, esta operación puede insumir tres o cuatro horas, mientras que en un Van de Graaff un cambio de energía se realiza en pocos minutos.

En general, aunque esto es aún materia de polémica, se entiende que un acelerador tandem requiere para su operación menos personal que un ciclotrón. Ciertamente que los primeros pueden ser operados en forma rutinaria por personal no especializado. Por ejemplo, suele ocurrir que en muchos laboratorios con aceleradores Van de Graaff, los turnos de operación nocturna son cubiertos por los mismos investigadores, mientras que donde se usan ciclotrones, dichos turnos deben ser cubiertos por operarios especializados.

Finalmente debe considerarse el costo de ambas máquinas: para un acelerador tandem Van de Graaff de 17-18 MV en el terminal, es aproximadamente 2.5×10^6 U\$S; el costo de un ciclotrón isócrono de 130 MeV es levemente superior, alrededor de 3×10^6 U\$S, entendiéndose, en ambos casos, la máquina sin equipos auxiliares. El consumo de energía eléctrica es menor en un tandem que en un ciclotrón. El costo de mantenimiento es difícil de estimar pero puede suponerse aproximadamente equivalente en ambos casos.

Un resumen de la evaluación hecha hasta aquí se muestra en la Tabla V.4.

Tabla V.4

Característica	Ciclotrón	Tandem
Energía	mejor para $A \leq 30$	mejor para $A > 40$
Intensidad	mejor	--
Variedad iones	--	mejor
Definición energía	--	levemente mejor
Posibilidad elegir energía	--	mejor
Facilidad de operación	--	mejor
Costo	--	mejor

Como conclusión, entonces, se estima que un tandem es la máquina más conveniente para la Argentina, especialmente debido a la diversidad de proyectiles que pueden acelerarse con ella, lo cual permite atacar una enorme variedad de problemas (ver capítulo VI).

Es conveniente hacer un breve comentario final referido a un estudio realizado por este Departamento hace 5 años. Entonces, un análisis similar favor-

recía la compra de un ciclotrón isócrono. La razón de la diferencia reside en que en este último lustro, el desarrollo de los tandem ha experimentado un avance muy importante. Algunas razones pueden discernirse fácilmente. El deseo de poder acelerar cualquier tipo de ion a lo largo de la tabla periódica, junto con el hecho de que, acelerar protones y otros iones livianos a energías muy superiores a 100 MeV no encuentra un fuerte justificativo en términos de los experimentos que puedan realizarse, puede contarse como la principal causa de este desarrollo. Por otra parte, la decisión adoptada por otros países, de apoyar la investigación en colisiones de iones pesados, condujo a que una nueva empresa ingresara al mercado de máquinas tipo tandem y la competencia que se originó en este hecho, se reflejó inmediatamente en los resultados. Por ejemplo, en el año 1970 se inauguraba el acelerador más importante del mundo en el Brookhaven National Laboratory. Consistía en realidad en el acoplamiento de dos tandem. Cada uno alcanzaba un voltaje de terminal de algo menos de 10 millones de voltios. Un enorme esfuerzo había sido realizado para concretar esta faciliidad. Hoy en día, a sólo un lustro de distancia, la misma performance, es decir un total de 20 millones de voltios en el terminal, se alcanza con un solo tandem. Este ejemplo ilustra el avance mencionado más arriba que se ha operado en el desarrollo de los aceleradores tipo Van de Graaff. No ha habido un avance similar en cuanto a los ciclotrones isócronos. Por el contrario, el mercado se ha contraído hasta tal punto, que la firma alemana AEG, (uno de los más importantes candidatos en la licitación que se intentó realizar en 1970), ha interrumpido su línea de fabricación de ciclotrones.

VI. USOS DE UN ACCELERADOR ELECTROSTATICO DE 16 MV EN INVESTIGACION Y DESARROLLO

El objetivo de esta sección es dar una idea global de las diferentes posibilidades de uso y aplicación de un acelerador electrostático de 16 MV. Como se verá a continuación, tales aplicaciones abarcan una gran variedad de disciplinas en las cuales la investigación básica y aplicada ya han dado resultados verdaderamente notorios.

Los usos actuales de un acelerador electrostático de 16 MV se pueden clasificar en las siguientes áreas:

- (1) Física Nuclear
- (2) Física Atómica
- (3) Física de Estado Sólido
- (4) Astrofísica
- (5) Metalurgia y Física de Reactores
- (6) Aplicaciones en Biología, Medicina y Química.

Es nuestra idea tratar de describir las diferentes áreas, haciendo particular énfasis en aquellos temas de principal interés para los investigadores del Departamento de Física Nuclear de la CNEA y teniendo en cuenta, además, la capacidad científica de otros profesionales argentinos.

VI.1. Física Nuclear

El acelerador electrostático de 16 MV está en condiciones de acelerar una gran variedad de iones a diferentes energías, dependiendo de la cantidad de electrones que se le puedan desprender en el terminal al ion en cuestión. Es así que, por ejemplo, se consiguen energías máximas de 32 MeV para protones, de 144 MeV para el oxígeno y de aproximadamente 270 MeV para el hierro. Estos rangos de energía conjuntamente con la variedad de iones que se pueden acelerar y la resolución energética de los mismos, hace que sea posible la investigación de cuestiones fundamentales del núcleo atómico que de otra forma no podrían ser estudiadas.

Los proyectos de investigación en Física Nuclear se pueden dividir en los siguientes temas:

VI.1.1 Reacciones Nucleares. La medición de esquemas de niveles y propiedades de niveles excitados, como ser vidas medias, momentos dipolares magnéticos, momentos cuadrupolares eléctricos, etc., proveen una gran información acerca de la estructura del núcleo. En particular dan una idea muy acertada de la función de onda correspondiente, proporcionando a la investigación teórica

un elemento de prueba de los modelos existentes y posibilitando la introducción de refinamientos en los cálculos.

El bombardeo con iones pesados de energías considerables, favorece la transferencia del momento angular y hace posible la excitación de estados con alto spin no estudiados hasta ahora; el decaimiento gamma de estos estados permite la identificación de diferentes bandas rotacionales y vibracionales de estos núcleos y provee información de gran valor especialmente en núcleos deformados, donde se pueden llegar a obtener límites en la validez de diferentes modelos, por ejemplo, entre modelos colectivos y de partícula independiente.

VI.1.2 Reacciones Nucleares. Lógicamente el espectro de posibles reacciones nucleares se amplía mucho al poder exceder la barrera coulombiana entre dos iones relativamente pesados, como es el caso del acelerador en cuestión.

Las reacciones nucleares entre núcleos pesados han despertado mucho interés en los últimos dos años, como consecuencia de la gran cantidad de información que se puede obtener sobre el núcleo mediante este tipo de colisiones. Ello es debido principalmente a (1) el elevado momento angular transferido en la reacción y (2) la posibilidad de transferir varias partículas en la reacción. Esto lleva a detectar formaciones nucleares desconocidas y a sondear el núcleo con mayor profundidad que lo alcanzado hasta ahora.

El scattering elástico e inelástico de partículas livianas, principalmente protones, es también de gran interés debido a que la energía de dichos protones es relativamente alta. En esta area destacamos:

- (a) Experiencias de scattering inelástico y transferencia de uno y dos nucleones en la zona de núcleos doblemente mágicos. Estas experiencias han sido ya realizadas en la zona del Pb, pero se hace necesaria su repetición, debido a que la precisión obtenida en las secciones eficaces publicadas (20-30 %) no es suficiente para decidir entre los distintos cálculos teóricos publicados hasta el presente. En particular, en esta zona es directamente aplicable la teoría nuclear de campos, que permite tener en cuenta efectos debidos al principio de Pauli y a la sobrecompletitud debida a la inclusión simultánea de estados colectivos y de partícula independiente.
- (b) Reacciones de scattering inelástico y de transferencia de uno y dos nucleones que alimenten estados en núcleos impares y superconductores. Se conoce relativamente poco sobre el quintuplete de estados obtenidos al acoplar una cuasi-partícula con un fonón $1^{\pi}=2^{+}$. La teoría nuclear de campos permite hacer predicciones sobre el orden y

la distancia entre los miembros del quintuplete.

(c) Reacciones de captura (p,t) y (p,He^3) en la zona del Ni y del Sm.

Estas reacciones tienen un Q negativo de aproximadamente 16 MeV, lo que imposibilita su estudio con los aceleradores electrostáticos existentes, que suministran haces de protones de energía inferior a los 30-35 MeV. Estas reacciones son fundamentales para estudiar los efectos debidos a fuerza de apareamiento con $T=1$.

Otro tema de importancia es el estudio de mecanismos de reacciones estableciendo principalmente las diferencias entre reacciones de núcleo compuesto y reacciones directas, como así también la investigación de estructuras intermedias entre las dadas por el núcleo compuesto y aquellas dadas por los estados de una partícula. Tales estructuras intermedias o estados de salida, permiten detectar excitaciones relativamente simples del núcleo, dando lugar a una descripción más exacta del mismo. Como ejemplo pueden mencionarse las resonancias isobáricas análogas.

Un tema en el que se desarrolla una gran actividad, es el estudio de reacciones de captura radiativa en las que el núcleo compuesto decae, mediante radiación gamma, a su estado fundamental o primeros estados excitados. Estas reacciones, también llamadas reacciones fotonucleares, inversas permiten el estudio de la resonancia gigante dipolar eléctrica como así también de resonancias gigantes cuadrupolares eléctricas y dipolares magnéticas, recientemente descubiertas. Con la posibilidad de acelerar iones pesados, pueden ser estudiadas estas reacciones de captura radiativa entre núcleos pesados.

VI.1.3 Física de Neutrones. Por último, los haces relativamente intensos ($\sim 5\mu A$) de protones o deuterones a la salida del tanque (haz no analizado), permiten la producción de neutrones rápidos mediante las reacciones $^9Be(p,n)^9B$ y $^9Be(d,n)^{10}B$. Estos pueden ser usados en la investigación básica en el estudio de reacciones (n,γ) como así en la medición de espectros de energía asociados con la fisión rápida de algunos isótopos (^{232}Th , ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu , etc.). Esta posibilidad de producción de neutrones rápidos también puede ser usada en temas de gran aplicación como se verá más adelante.

VI.2. Física Atómica

La posibilidad de acelerar iones pesados, mencionada anteriormente, permite el estudio de problemas fundamentales de la física atómica. Examinaremos algunos de los temas más importantes.

VI.2.1 Átomos fuertemente ionizados. En física atómica, el estudio de sistemas hidrogenoides y helioides (átomos compuestos por un núcleo y sólo uno

o dos electrones) es particularmente interesante puesto que tales sistemas pueden ser tratados exactamente desde un punto de vista teórico. La observación de espectros ópticos y rayos X emitidos por estos átomos fuertemente ionizados permite, en particular:

- (a) Extraer parámetros nucleares como ser momentos magnéticos y cuadrupolares del núcleo, tanto en núcleos en su nivel fundamental como en estados excitados de vida media muy corta ($\leq 10^{-12}$ seg).
- (b) La medición de efectos isotópicos volumétricos que varían como Z^4 .
- (c) La verificación de ciertas predicciones de la electrodinámica cuántica, como por ejemplo la variación del corrimiento Lamb en las series isoelectrónicas (átomos de un mismo número de electrones pero de un número variable de protones).
- (d) El estudio de la captura radiativa de un electrón por iones hidrogenoides o helioides atravesando un cristal. Esta captura provee información sobre la distribución de momentos de los electrones en el cristal.

VI.2.2 Colisiones Atómicas. La excitación de los sistemas electrónicos en colisión es otro tema de interés de la física atómica. En particular, el estudio de sistemas cuasimoleculares formados cuando dos átomos se acercan a una distancia suficientemente grande como para compartir sus electrones. En este caso, es de gran interés conocer las energías de los orbitales de los electrones y compararlos con aquellos del átomo compuesto. A suficiente energía, es también posible formar un sistema quasi-atómico cuya carga sea igual a $Z_1 + Z_2$ (donde Z_1 y Z_2 son el número de protones del proyectil y blanco, respectivamente). Si $Z_1 + Z_2 > 100$, existe la posibilidad de estudiar sistemas electrónicos no estables y aún no formados mediante otros mecanismos.

VI.2.3 Espectroscopía de átomos con núcleo excitado. En física atómica pueden realizarse experimentos utilizando haces de iones secundarios en los cuales el núcleo ha sido excitado en el curso de una reacción nuclear. Las rayas ópticas emitidas por estos átomos sufren un desplazamiento isomérico debido a la interacción entre los electrones y protones; este desplazamiento puede ser utilizado para separar los iones cuyos núcleos han sido excitados.

VI.3 Física del Estado Sólido

El uso de aceleradores electrostáticos de partículas para problemas de física de estado sólido ha adquirido gran importancia en los últimos años. La posibilidad de acelerar iones pesados con el acelerador de 16 MV, aumenta enormemente las perspectivas de investigación en este campo. Mencionaremos

algunos de los temas más importantes.

VI.3.1 Estudio de intercambio de cargas. Determinación de cargas medias en un sólido y medición de las secciones eficaces de intercambio. Estas experiencias conducen a precisar más exactamente el concepto de carga media.

VI.3.2 Estudio de caracterización y dependencia de estados iónicos atravesando un sólido. Sabemos que la sección eficaz para la producción de rayos X es muy sensible al estado de carga el cual, a la vez, depende fuertemente de la energía. Es entonces posible estudiar los intercambios de carga y caracterizarlos mediante los rayos X emitidos, como así también su dependencia mediante estudios de canalización.

VI.3.3 Interacciones Hiperfinas. En los estudios de interacciones hiperfinas se está siempre limitado a la medición de un producto de dos magnitudes: una nuclear (momento magnético o cuadrupolar, variación relativa de rayos nucleares, etc.) y la otra característica de la configuración electrónica del átomo en cuestión.

La considerable energía transferida al núcleo de retroceso formado en una reacción iniciada con iones pesados y la subsiguiente alineación de su momento nuclear, permiten el estudio de interacciones hiperfinas de diversas formas.

La implantación del núcleo de retroceso en un material ferromagnético, crea un campo magnético hiperfino que actúa sobre el núcleo durante su vida media. Conociendo el momento magnético del núcleo en cuestión se pueden medir estos campos hiperfinos, o viceversa. Debido a la gran magnitud de los campos hiperfinos (10 - 100 Mega Gauss) se pueden estudiar propiedades nucleares de estados de vida media muy corta ($\leq 10^{-12}$ segundos).

La posibilidad de átomos fuertemente ionizados también permite el estudio de interacciones hiperfinas en átomos hidrogenoides o helioides, y el estudio de propiedades de estados nucleares de vida media corta.

VI.4. Astrofísica

Los aceleradores de partículas permiten, en general, abordar tres tipos de investigación de interés para la astrofísica:

- Reacciones nucleares que tienen lugar en las estrellas.
- Propiedades de átomos ionizados.
- Preparación de detectores de partículas con iones idénticos a aquellos encontrados en la radiación cósmica.

En particular el acelerador electrostático de 16 MV puede aplicarse a los tres temas mencionados.

VI.4.1 Reacciones nucleares. Existen dos categorías importantes de reacciones nucleares en las cuales el acelerador de 16 MV tiene una vasta aplicación y una tercera categoría con muy limitada aplicación.

- Reacciones termonucleares responsables de la nucleosíntesis estelar ($E < 1$ MeV/nucleón).
- Reacciones nucleares en la envoltura de las estrellas sometidas a explosiones internas ($E \leq 5-10$ MeV/nucleón).
- Reacciones nucleares inducidas por la aceleración de partículas en la superficie de las estrellas ($E = 10-50$ MeV/nucleón).

VI.4.2 Átomos fuertemente ionizados. Este tema se superpone en parte con los ya discutidos en la sección de física atómica, ya que el conocimiento de la estructura de átomos fuertemente ionizados es aplicable a las condiciones existentes en las estrellas.

VI.5. Metalurgia y Física de Reactores

Si bien los aceleradores electrostáticos no han sido la herramienta más usada en la investigación asociada a la física de reactores, su enorme versatilidad puede ser explotada en este sentido, especialmente como apoyo a otros laboratorios de la CNEA.

Entre las posibles aplicaciones de esta máquina para problemas de reactores podemos citar los siguientes ejemplos que, además, son coherentes con los planes del Departamento:

- Medición de secciones eficaces de interés para la física de reactores.
- Simulación del crecimiento de productos de reacción que ocurren tanto en los materiales estructurales como en los materiales combustibles de los reactores. El método a usar en este caso utiliza la implantación de iones de gases inertes en metales y cerámicos. Este proceso es una excelente simulación del daño por radiación producido por la prolongada exposición del seno del reactor a neutrones rápidos.

VI.6 Aplicaciones en Biología, Medicina y Química

Los aceleradores de partículas, tanto electrostáticos como electrodinámicos, fueron concebidos originalmente para investigaciones en temas de física, pero los últimos años han demostrado que su uso puede ser extendido a problemas de naturaleza muy diversa (Biología, Medicina, Química). Un ejemplo de aplicación de un acelerador electrostático en problemas de Biología y Medicina es el uso de neutrones rápidos para el tratamiento de células cancerosas. Dichos neutrones pueden obtenerse fácilmente mediante reacciones

$^9\text{Be}(p,n)^9\text{B}$ ó $^9\text{Be}(d,n)^{10}\text{B}$. Las secciones eficaces de estos procesos muestran una rápida variación de la energía de los neutrones resultantes con una variación relativamente lenta de los protones incidentes. Las energías y corrientes utilizadas para producir la reacción son del orden de 1 - 5 μA de protones a una energía de 10 MeV.

En teoría, estos neutrones rápidos pueden ser más efectivos que otro tipo de radiación (X ó gamma) para el tratamiento del cancer debido a los siguientes factores: (a) menor dependencia a la oxigenación fisiológica completa durante la irradiación, (b) menor variación en la respuesta a la radiación a través del ciclo de replicación celular y (c) menor capacidad de reproducción de las células dañadas afectadas.

VII. CONCLUSIONES

De las consideraciones expuestas en los apartados precedentes resulta que:

- (a) Es conveniente dotar a la CNEA, a través de su Departamento de Física Nuclear, de una nueva máquina para aceleración de partículas que sustituya las utilizadas hasta el presente, incursas en notoria obsolescencia desde hace ya varios años.
- (b) Es necesario que ese reequipamiento contemple, a la vez, una apertura de posibilidades para las investigaciones en el campo de la física y la intensificación del uso de aceleradores en programas de química, biología, metalurgia, reactores, etc.
- (c) De entre las máquinas aceleradoras existentes en el mercado internacional, un acelerador electrostático de 16 MV es la que presenta las características más adecuadas para satisfacer los requerimientos mencionados siendo, a la vez, la de menores costos de instalación, operación y mantenimiento.
- (d) Es necesario encarar la instalación de la máquina con criterios que amplíen al máximo su posible impacto en la comunidad científica argentina. Para ello su ubicación debe contribuir a facilitar su uso por estudiantes graduados y personal de las universidades y de otros organismos de investigación y desarrollo.

Conviene destacar, por último, que es imposible obtener de la instalación propuesta un rendimiento acorde con la magnitud de la inversión involucrada, si no se contemplan simultáneamente los siguientes puntos: (i) la disponibilidad de equipo periférico mayor que asegure su utilización adecuada, (ii) la dotación de personal suficiente, en cantidad y nivel, como para extraer la información de alta calidad científica que la instalación es capaz de suministrar y, (iii) los medios de dotar al Departamento de recursos económicos y mecanismos operativos que garanticen una alta ejecutividad tanto en la adquisición, montaje y puesta en marcha del proyecto, como en el planeamiento y realización de experimentos, procesamiento de sus resultados y en el contacto con los laboratorios homólogos del exterior.

A P E N D I C E

A. LOCALIZACION

La dotación de maquinaria de alto costo dedicada fundamentalmente a actividades de investigación básica y aplicada con objetivos a mediano y largo plazo, debe encararse con óptica amplia, no limitada al ámbito institucional. Esta consideración ha sido tomada en cuenta a lo largo del análisis de los apartados anteriores, conducentes a definir el tipo de máquina a instalar. La misma adquiere decisiva validez si es considerada asimismo, al analizar las posibilidades de localización del proyecto. Los factores de evaluación serán:

- I. Disponibilidad de terreno apto
 - (a) Area disponible
 - (b) Características técnicas
- II. Satisfacción de reglamentación local
 - (a) Riesgo radiológico
 - (b) Altura edificios
 - (c) Zona residencial, fabril
- III. Facilidades para la operación y utilización
 - Personal de operación
 - (a) Número
 - (b) Distancia al lugar de residencia
 - Personal de investigación
 - (a) Número previsto estable y ocasional
 - (b) Procedencia: CNEA, Universidades, becados, etc.
 - (c) Distancia al lugar de trabajo y/o residencia
 - Relaciones con otras actividades
 - (a) Otras dependencias de la CNEA
 - (b) Universidades
 - Servicios complementarios
 - (a) Administración central
 - (b) Seguridad
 - (c) Limpieza
 - (d) Comedor
 - (e) Talleres
 - (f) Biblioteca

IV. Costo obra

- Costo terreno
- Costo obra civil en función de las características técnicas del terreno
- Costo transporte de componentes
- Costo provisión servicios esenciales (agua, fuerza eléctrica)

A.1. Orden de importancia de los factores

Los factores de los grupos I y II son "sine qua non". Los del grupo III son de particular significación en cuanto al cumplimiento integral de los objetivos perseguidos con la obra. Los del grupo IV tienen relativamente poca importancia frente a los anteriores, teniendo en cuenta el costo de la máquina; pueden incidir en la selección en la medida en que haya ubicaciones posibles, en iguales condiciones, frente a los factores I, II y III.

A.2. Criterio fundamental de selección. Preselección de ubicaciones

En primera instancia conviene considerar la posibilidad de instalar el tandem en los Centros Atómicos existentes:

- (a) Ezeiza
- (b) Bariloche
- (c) Constituyentes
- (d) Sede Central

La Sede Central queda descartada de inmediato por no disponer de espacio. En cuanto a Constituyentes sería válida análoga conclusión, si no fuera porque desde larga data han existido contactos con las autoridades del INTI con miras a incorporar terrenos de propiedad de éste, lindantes con el C.A.C., a la jurisdicción de la CNEA.

A.3. Datos y características del proyecto

Se resumen las características en lo que se refiere a los factores que inciden en la selección de localización:

(a) Area requerida. Existen dos variantes en cuanto a la instalación de la máquina, según se proyecte la misma horizontal o vertical. Existen buenos diseños y máquinas análogas en operación en ambas disposiciones. Se llamarán en lo que sigue: variante H y variante V. En lo que hace al área requerida, se tiene la siguiente caracterización:

Variante H: Edificio máquina:

Recinto máquina:	$70 \times 10 = 700 \text{ m}^2$
Area experimental:	$16 \times 25 = 400 \text{ m}^2$

Area espectrómetro magnético: $15 \times 20 = 300 \text{ m}^2$

Area auxiliares: $15 \times 40 = 600 \text{ m}^2$

Edificio laboratorios, facilidades auxiliares y zona de control de seguridad:

2 plantas de $(25 \times 80) \text{ m}^2$ cada una.

Variante V: difiere solamente en las dimensiones del recinto para la máquina, el cual está construido en forma de torre de aproximadamente $(7 \times 7) \text{ m}^2$ de planta.

El area total es en la variante H de 6000 m^2 y de 5300 m^2 en la variante V.

(b) Altura edificios.

Variante H: Altura máxima $\sim 8-9 \text{ m}$

Variante V: Altura general $8-9 \text{ m}$; altura torre $\sim 50 \text{ m}$

(c) Concentración de cargas. En la variante H no hay concentraciones de carga correspondiente a la máquina o sus componentes. En la variante V, el peso de la máquina, de aproximadamente 112 ton está concentrado en una superficie de $\sim (6 \times 6) \text{ m}^2$.

En ambos casos los pesos del imán deflector y del analizador electromagnético de alrededor de 20 ton , apoyan en superficies de aproximadamente $(2 \times 2) \text{ m}^2$.

(d) Requerimientos de servicios

Fuerza motriz: 100 kVA

Agua para refrigeración: $\sim 30 \text{ m}^3/\text{h}$

(e) Riesgo radiactivo. El tipo de instalación no ofrece inconveniente alguno para que puedan adoptarse todas las medidas que dictamine la Autoridad de Seguridad en lo que se refiere a:

- Blindaje biológico
- Eliminación de sustancias radioactivas
- Transporte de material radioactivo
- Protección y monitoreo de la radiación

(f) Personal

Personal para operación y mantenimiento

Equipos eléctricos y mecánicos: 2 Ingenieros, 12 técnicos

Equipos electrónicos: 2 Ingenieros, 6 técnicos

Computación: 1 Profesional, 2 técnicos

Administración: 2 Secretarías

Limpieza: 3 Peones

Total: 30

Personal que hará uso del tandem

Personal estable Dto. Física Nuclear: 35

Personal otros Dtos.de CNEA: 30

Usuarios externos (Personal Dtos. de Física de Universidades nacionales, estudiantes graduados, etc.): 10-20

El total aproximado de personas que trabajarán en el edificio de la máquina será de 100 (60 permanentes).

(g) Planes de trabajo. Los planes de trabajos corresponderán a los temas que se describen en el capítulo VI.

A.4. Comparación de las ubicaciones preseleccionadas

Ellas son:

(a) C.A.Ezeiza

(b) C.A.Bariloche

(c) C.A.Constituyentes (supuesto incrementado el predio por cesión de terrenos del INTI a favor de la CNEA).

I. Disponibilidad de terreno apto: Las características técnicas de los terrenos en las tres ubicaciones posibles, admiten la instalación de la máquina. En los casos de Ezeiza y Constituyentes existen ventajas desde el punto de vista de la facilidad de transporte de cargas durante el montaje.

II. Satisfacción de la reglamentación local. Las tres ubicaciones son satisfactorias en cuanto a riesgo radiológico, aceptando que el proyecto cumpla con los requerimientos de Protección y Seguridad.

Con respecto a la altura de los edificios, existen problemas en la variante V, en el caso del C.A.Ezeiza. Al excluirse que pueda lograrse la aprobación de las autoridades de Aeronáutica para erigir una torre de aproximadamente 50 m de altura en ese centro, debido a la proximidad del Aeropuerto Internacional. El considerar al C.A.Ezeiza como ubicación posible, elimina la variante V y consecuentemente, limita la oferta en el mercado internacional.

La altura de los edificios no representa impedimento alguno en el caso de los otros dos centros.

En las tres ubicaciones, por tratarse de Centros Atómicos, resulta posible instalar el tandem, sin que haya reglamentaciones zonales que lo prohiban.

III. Facilidades para la operación y la utilización de la máquina. Ambos centros del Gran Buenos Aires resultan más favorables que el C.A.Bariloche desde este punto de vista, dado que:

- Ofrecen la posibilidad de utilizar la totalidad de la infraestructura técnica existente en el laboratorio del Sincrociclotrón, sin tener que trasladar

al personal de sus domicilios actuales.

- La misma consideración es válida para la totalidad del personal científico del Departamento de Física Nuclear, principal usuario de la nueva instalación.
- La máquina puede ser utilizada, sin incurrir en problemas y gastos de traslado, por los investigadores y tecnólogos de las otras dependencias de la CNEA (Radioisótopos, Metalurgia, Química, Radiobiología) como así también por los procedentes de otras instituciones, especialmente las universitarias, radicadas en Buenos Aires y La Plata.
- Ofrecen la posibilidad de hacer uso de los servicios complementarios que puede facilitar la CNEA tanto en el C.A.Ezeiza como en el C.A.Constituyentes y desde su Sede Central.

En lo que respecta al análisis comparativo entre los centros Ezeiza y Constituyentes, este último se ve favorecido por ofrecer una mayor posibilidad de utilización por terceros ajenos a la CNEA y, por consiguiente, de alcanzar en forma integral los objetivos perseguidos con la obra.

IV. Costo de la obra

Si bien no se ha analizado en detalle el costo de la obra civil y facilidades auxiliares en función de la ubicación, no pueden preverse sustanciales diferencias.

El costo de los equipos sería incrementado por la alternativa Bariloche debido al mayor gasto en transporte.

El costo de operación y mantenimiento de la máquina, al igual que los gastos de las investigaciones, serían superiores en el C.A.Bariloche que en el C.A.Ezeiza ó C.A.Constituyentes, no solamente por el mayor costo de la infraestructura de apoyo que tiene ese Centro, sino también por los ineludibles y frecuentes gastos de traslado de personal de CNEA y de terceros.

A.5. Conclusiones

Resumiendo los puntos anteriores:

- Las tres ubicaciones preseleccionadas, CAB, CAE y CAC son satisfactorias en cuanto a la aptitud de los terrenos disponibles o a estar disponibles.
- La ubicación en el CAE o en el CAC ofrecen mayores ventajas que el CAB en lo que respecta a facilidades para operación de la máquina.
- El CAC agrega a la ventaja anterior, el óptimo grado de aprovechamiento de la inversión y el cumplimiento de su finalidad de investigación.
- El CAE limitaría las posibilidades, en cuanto a la oferta de máquinas en el mercado internacional, a la versión horizontal.

- El costo del proyecto resultaría superior en el CAB.

Por todo ello resulta aconsejable elegir el CAC como ubicación más conveniente para la instalación del tandem, considerando como segunda prioridad el CAE en el caso en que no fuera posible concretar a tiempo la ampliación del perímetro de propiedad de CNEA en Constituyentes.

B. ESTIMACION DE COSTOS

B.1 Equipamiento

B.1.1 Equipo a ser incorporado en el corto plazo

Acelerador

- Fuente de Iones	U\$S	250.000
- Sistema inyector y extensión de baja energía	U\$S	150.000
- Sistema de aceleración con tanque de presión	U\$S	2.500.000
- Sistema extractor y extensión de alta energía	U\$S	250.000
- Sistema Selector	U\$S	80.000
- (7) Líneas de experimentación	U\$S	200.000
- Sistema almacenamiento y transferencia de gas	U\$S	<u>425.000</u>
<u>Total Acelerador</u>	U\$S	3.855.000

Periféricos

- Sistema de adquisición de datos	U\$S	150.000
- Conexiones	U\$S	65.000
- Equipos de medición y detectores	U\$S	200.000
- Electrónica permanente	U\$S	60.000
- Electrónica complementaria	U\$S	40.000
- Laboratorio Blancos	U\$S	60.000
- Producción y almacenamiento de Nitrógeno Líquido	U\$S	150.000
- Accesorios	U\$S	<u>250.000</u>
<u>Total Periféricos</u>	U\$S	975.000

Transporte

- Empaque y flete	U\$S	<u>220.000</u>
<u>Total Transporte</u>	U\$S	220.000

Edificio

- Laboratorio Acelerador (3.000 m ²)		\$ 240.000.000
- Laboratorios Periféricos y Talleres (1.200 m ²)		\$ 72.000.000
- Oficinas, Biblioteca, Aulas, Sanitarios, etc. (1.800 m ²)		\$ <u>90.000.000</u>
<u>Total Edificio</u>		\$ 402.000.000

Total Equipamiento a corto
plazo

U\$S 5.050.000 \$ 402.000.000

B.1.2 Equipo a ser incorporado en el mediano plazoPeriféricos

- Aparatos de medición	U\$S	700.000
- Accesorios	U\$S	<u>150.000</u>
<u>Total Periféricos</u>	U\$S	850.000

Total Equipamiento a me-
diano plazo

U\$S 850.000

Totales Equipamiento

U\$S 5.900.000 \$ 402.000.000

B.2 Gastos Operativos

B.2.1 Bienes y servicios no personales

Durante las etapas de construcción, montaje y puesta en marcha, cuya duración total puede estimarse en cuatro años, los rubros de mayor significación imputables al proyecto, serán:

- Becas Internas	\$ 1.500.000
- Viajes al exterior	\$ 5.000.000
- Científicos visitantes	\$ 1.000.000

Durante el último año, en relación con la puesta en operación y marcha de prueba, así como durante el primer año de operación, deberá agregarse a aquellos, el rubro:

- Consultoría	\$ 600.000
---------------	------------

Durante la operación normal del proyecto, los gastos habituales serán:

- Becas Internas	\$ 1.500.000
- Viajes al Exterior	\$ 1.300.000
- Científicos Visitantes	\$ 1.000.000
- Corriente Eléctrica	\$ 1.800.000
- Mantenimiento	\$ 2.100.000

A los tres años de instalación del acelerador se prevé un gasto significativo derivado de la necesidad de recargar el gas lo que insume aproximadamente \$ 22.500.000.

B.2.2 Gastos en Personal

El personal estable de la CNEA asignado en forma total al mantenimiento y operación de la máquina o a su utilización para investigación en física nuclear, está compuesto por alrededor de 65 personas distribuidas en:

- Personal profesional	35
- Personal técnico	25
- Personal auxiliar	5

A los valores de retribuciones vigentes a la fecha del presente estudio, ello represente, un total anual estimado de:

- Gastos en personal \$ 33.800.000

B.2.3 Total anual en gastos operativos

Durante la operación normal del laboratorio de física nuclear dotado de la nueva máquina se ha calculado, por consiguiente un total anual de gastos operativos de \$ 41.500.000 los cuales, al valor de 1 U\$S = \$ 300 que se ha adoptado para estas estimaciones, equivale a U\$S 140.000. Ello representa aproximadamente un 2 % del valor de la inversión inicial total.

Usualmente y de acuerdo con el análisis efectuado en la publicación "Isochronous Cyclotrons - 1969" por F.T.Howard, el costo anual de operación de una instalación como la que trata el presente estudio, es del orden del 10 % del costo total de la instalación.

El porcentaje sensiblemente inferior aquí obtenido es debido a que el rubro salarios, sin duda el de mayor peso relativo entre los gastos operativos, está drásticamente deprimido, en particular, cuando se calcula en divisas.