# History and Technology Developments of Radio Frequency (RF) Systems for Particle Accelerators (Historia y desarrollos tecnológicos de sistemas de radiofrecuencia (RF) para aceleradores de partículas)

**Abstracto:**

Este artículo intenta dar una cuenta histórica y revisar los desarrollos tecnológicos e innovaciones en sistemas de radiofrecuencia (RF) para aceleradores de partículas. La evolución del campo electrostático al uso de voltaje de RF sugerido por R. Wideröe permitió superar las deficiencias de los aceleradores electrostáticos, lo que limitó el campo eléctrico máximo alcanzable debido a la ruptura del voltaje. Después de una introducción, proporcionaremos revisiones de los desarrollos tecnológicos de los sistemas de RF para aceleradores de partículas.

**Publicado en:**[IEEE Transactions on Nuclear Science](https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=23)( Volumen: 63 , [Número: 2](https://ieeexplore.ieee.org/xpl/tocresult.jsp?isnumber=7454792), abril de 2016 )

**Página (s):** 707 - 750

**Fecha de publicación:** 10 de noviembre de 2015

**Información de ISSN:**

**Número de acceso de INSPEC:** 15934714

**DOI:**[10.1109 / TNS.2015.2485164](https://doi.org/10.1109/TNS.2015.2485164)

**Editorial:**IEEE

**Agencia fundadora:**

**SECCIÓN I.**

## **Introducción**

La historia de los aceleradores lineales se remonta a 1924 cuando G. Ising propuso una estructura compuesta de tubos de deriva pulsada secuencialmente, donde las partículas se acelerarían en los espacios entre ellos [1] . En 1928, R. Wideröe propuso aplicar voltaje de RF entre tubos de deriva sucesivos, que se probó con éxito [2] . En 1931, DH Sloan y EO Lawrence hicieron mejoras [3] al acelerador de Wideröe, mientras que M. Stanley Livingston trabajó en un acelerador "cíclico" que más tarde se convirtió en el primer acelerador de RF, ciclotrón [4] y [5]. Estos primeros desarrollos sentaron las bases para frecuencias más altas y sistemas de potencia de RF más altos para aceleradores de partículas. Los avances importantes en el desarrollo de la aceleración de RF ocurrieron al final de la Segunda Guerra Mundial, cuando se desarrollaron fuentes de energía de RF en rangos de megavatios (MW) a frecuencias de cientos de megahercios (MHz) principalmente para radares. La base para la tecnología moderna de microondas fue establecida por WW Hansen en la Universidad de Stanford en 1937, mientras trabajaba en el concepto de cavidades resonantes. Hansen, junto con Russell y Sigurd Varian (los hermanos Varian) inventaron el klystron, un amplificador de alta frecuencia para generaciones de microondas, en la Universidad de Stanford [6] y [7]. Deberíamos enfatizar que la transformación posterior a la Segunda Guerra Mundial de dispositivos de RF de alta frecuencia en una tecnología madura para una amplia gama de aplicaciones, incluidos los aceleradores, se basó principalmente en el esfuerzo de guerra hacia el desarrollo de dispositivos de radar, específicamente el desarrollo de dispositivos de radar de alta potencia relacionados con El trabajo sobre osciladores de magnetrón de alta potencia que se llevaron a cabo en Birmingham en el Reino Unido durante la primera parte de la década de 1940 [8] y [9] .

Compartir la tecnología de potentes dispositivos de radar con los Estados Unidos en 1940 desencadenó el inicio de una campaña masiva en tecnología de radar en los Estados Unidos que allanó el camino para la creación del Laboratorio de Radiación en el Instituto de Tecnología de Massachusetts para trabajar en tecnología de microondas. En 1948, R. y S. Varian (junto con Hansen y Ginzton) abandonaron Stanford para establecer su empresa (Varian Associates) para comercializar una amplia gama de klystrons para la transmisión de TV, lo que condujo a la transferencia de tecnología para la industrialización de RF para aceleradores aplicaciones. La construcción de un acelerador lineal de protones de 200 MHz en Berkeley bajo la dirección de Luis Álvarez en 1949 produjo un haz de 32 MeV / 0.4 mA. Este linac requiere∼ 2.5 MW de potencia de RF para un MeV de 28 secciones de linac [10] . Más de una década después, en 1956, se concibió la idea de un acelerador lineal de dos millas en la Universidad de Stanford basado en un linac pulsado de banda S [11] , [12] y [13] . Fue propuesta en 1957 y autorizada por el Congreso en 1961. En la década de 1960, el inicio del Sincrotrón de Protón (PS) de la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN) señaló la disponibilidad de RF y aceleradores de partículas para ser aplicados a gran escala [14]. En los últimos 50 años más o menos, hemos sido testigos de un rápido crecimiento en el desarrollo de tecnología de sistemas de RF en apoyo de aceleradores de partículas en constante evolución que van desde colisionadores grandes, fuentes de luz sincrotrónicas y láseres de electrones libres (FEL), linternas de recuperación de energía (ERL), hasta Pequeños aceleradores para aplicaciones médicas e industriales.

**SECCION II.**

## **Antecedentes históricos**

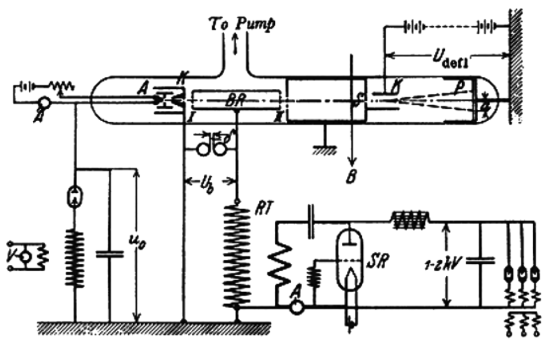
Es una tarea desalentadora resumir la rica historia de más de 80 años de sistemas de RF para aceleradores de partículas en unas pocas páginas. Idealmente, nuestro objetivo sería proporcionar una reflexión justa y exhaustiva del trabajo pionero de tantos, como Cockcroft, Walton, Wideröe, Lawrence, Livingston y Álvarez en las décadas de 1930 y 1940, que sentaron las bases para los aceleradores de partículas que lanzaron un nuevo y una era desafiante para el desarrollo de sistemas de RF para aceleradores de partículas. El trabajo pionero de los científicos británicos y estadounidenses en el radar a principios de la década de 1940 allanó el camino para la fabricación de los tubos transmisores de magnetrón del radar que se convirtieron en tecnología de radar moderna [15] y [16] . Un paso importante ocurrió en la década de 1950 cuando el oscilador magnetrón fue reemplazado por un amplificador[17] (un klystron de alta potencia o un tubo de onda viajera) como etapa final, utilizando un oscilador altamente estable para generar la señal del transmisor que también actuó como el oscilador local. El empleo de este esquema permitió mantener la coherencia de fase entre las señales transmitidas y recibidas. El desarrollo del radar durante la Segunda Guerra Mundial fue una innovación importante que dio un impulso significativo a la tecnología de RF para los aceleradores de partículas modernos a partir de ese momento. Desde su invención, los dispositivos de vacío de electrones (VED), incluidos los tubos de microondas, han sido el caballo de batalla para los sistemas de RF de aceleradores de partículas durante décadas, proporcionando una operación rentable, eficiente y confiable [18] y [19] .

En esta sección, comenzamos con la revisión de los aceleradores de CC a RF, incluidos los linacs, seguidos de los sincrotrones de protones, las fuentes de luz basadas en anillos de almacenamiento y los linacs de recuperación de energía.

**SECCION III.**

## **De DC a RF Aceleradores**

Como se mencionó anteriormente, la propuesta para usar la frecuencia de radio para la aceleración vino primero de Rolf Wideröe, un estudiante noruego en la Universidad de Aachen en Alemania [2] . Su acelerador experimental de RF de sobremesa en 1927 demostró previsión al usar la tecnología de radio reciente para acelerar las partículas entre los tubos de vacío de deriva. Figura 1muestra un diagrama esquemático del linac Wideröe utilizado para el experimento en el que se aplicó una señal de RF con una amplitud de 25 kV a 1 MHz desde un oscilador a un solo tubo de deriva entre dos electrodos conectados a tierra. Un haz de iones de potasio de carga única ganó la energía máxima en cada espacio, alcanzando una energía final de 50 keV. Esta energía era dos veces mayor que la que se podía obtener de una sola aplicación del voltaje aplicado. En 1929, basado en la idea de Wideröe, David H. Sloan de la Universidad de Berkeley comenzó a construir un linac compuesto de varios tubos de deriva para acelerar los iones pesados [3] .

[[](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-1-source-large.gif)](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-1-source-large.gif)

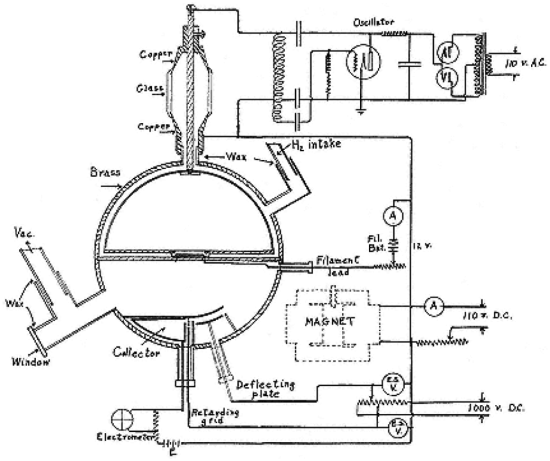
**Figura 1.**

Wideröe linac: el primer acelerador de RF [2] .

[Ver todo](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

Los sistemas de RF definitivamente jugaron un papel clave en los aceleradores de partículas con la invención del ciclotrón a pesar de que, en algún momento, también demostró que se necesitaba más progreso en los sistemas de RF para ir más allá de sus limitaciones.

La figura 2 muestra el diagrama esquemático original del primer ciclotrón de 1.2 MeV que fue construido por Ernest O. Lawrence y M. Stanley Livingston en Berkeley en 1931 [20] . En la parte superior de la figura hay un oscilador de 3.5 MHz que emplea un triodo. Como en el linac de Wideröe, el oscilador es un componente clave en tales sistemas de RF.

[[](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-2-source-large.gif)](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-2-source-large.gif)

**Figura 2.**

Diagrama esquemático original del primer ciclotrón de la tesis doctoral de Livingston [20] .

[Ver todo](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

El objetivo principal para el desarrollo del ciclotrón era alcanzar energías más altas, manteniendo sus dimensiones razonables. Para este alcance, se necesitaban un campo magnético más alto y también frecuencias de RF más altas. En ese momento, una limitación para obtener una frecuencia de RF más alta en los circuitos oscilantes provino de la potencia radiada desde el circuito en sí cuando la longitud de onda de RF se vuelve comparable con las dimensiones del circuito. Mientras trabajaba en las universidades de Berkeley y Stanford entre finales de los años 20 y 30, William W. Hansen propuso el concepto de resonador de cavidad, que ofrecía un nuevo enfoque para ir a frecuencias más altas construyendo circuitos resonantes. Otro hito en la tecnología de microondas se produjo con la colaboración entre los hermanos Russell y Sigurd Varian y su invención del klystron en 1937 en la Universidad de Stanford [7]. Después de la Segunda Guerra Mundial, los científicos aceleradores tuvieron acceso a la tecnología de microondas de bajo costo desarrollada por la industria para el esfuerzo de guerra. El objetivo era utilizar tecnología moderna de alta frecuencia para llevar haces de protones o electrones a energías sin precedentes.

Una década después, y justo después de la Segunda Guerra Mundial, Luis Álvarez inventó un nuevo acelerador lineal en Berkeley que era muy similar al de Sloan, pero que podía usar el potente klystron de alta frecuencia. Había una novedad en la estructura de Álvarez porque había tubos de deriva pero estaban suspendidos, no en un tubo no conductor, sino en un cilindro de cobre. Junto con los tubos de deriva, esto formó una cavidad eléctrica resonante en la que las ondas de RF se propagaron en una especie de guía de ondas. En otros linacs tempranos, había rejillas para proporcionar un enfoque radial colocado en ambos extremos de los tubos de deriva. Este dispositivo, ahora conocido como tubo de deriva linac (DTL), fue originalmente diseñado para usar la potencia provista por una unidad de radar de 200.56 MHz, pero finalmente no se usó la unidad de radar. El primer prototipo de linac construido por Luis Álvarez, un prototipo de tubo de deriva de 32 MeV, el linac, entró en funcionamiento en 1948. Muchos linacs de protones se construyeron en los años que siguieron a los primeros trabajos de Álvarez. Estos aceleradores se utilizaron principalmente como inyectores en sincrotrones.

Aproximadamente al mismo tiempo, el grupo Hansen-Ginzton en Stanford estaba progresando en el desarrollo de sistemas de alta frecuencia utilizando un linac de 3 GHz para electrones basados ​​en estructuras periódicas cargadas por el iris y ondas viajeras. Vale la pena señalar que la frecuencia de 3 GHz se eligió como un magnetrón de tipo radar y estuvo disponible como fuente de energía de RF durante las primeras pruebas experimentales. El klystron que también se desarrolló más tarde en Stanford mantuvo esta frecuencia y sigue siendo la frecuencia estándar para los klystrons comerciales.

La idea de linac había surgido 30 años antes, en 1924, cuando fue propuesta por el físico sueco Gustav Ising [1] . Fue entonces la primera idea práctica para la aceleración utilizando la acumulación de una serie de pequeños pasos de voltaje modesto. Esto pareció evitar los problemas de descomposición de las máquinas electrostáticas y abrió la puerta a todos los aceleradores que se construyeron en los años siguientes. El objetivo original de Ising era usar su linac para electrones, pero la tecnología necesaria tardó aún más en estar disponible para las linacas de electrones que para las de protones.

Después del éxito de la primera generación de aceleradores lineales, la solicitud de mayor energía continuó conduciendo al desarrollo de máquinas capaces de llevar protones a energías relativistas. Los primeros sincrotrones prototipo se probaron inmediatamente después de la guerra, pero solo a principios de los años 50 se diseñaron y construyeron sincrotrones a gran escala en los Estados Unidos y el Reino Unido, alcanzando energías en el rango GeV e introduciendo nuevos desafíos para los sistemas de RF. En un sincrotrón, la energía es transferida al rayo por solo unos pocos elementos a lo largo del anillo, las cavidades aceleradoras. Las cavidades de sincrotrón pueden tener una frecuencia más baja que las linacs (el tubo de deriva equivalente es toda la circunferencia del acelerador), así como un voltaje de separación menor, porque la aceleración tiene lugar en varias vueltas. Sin embargo,

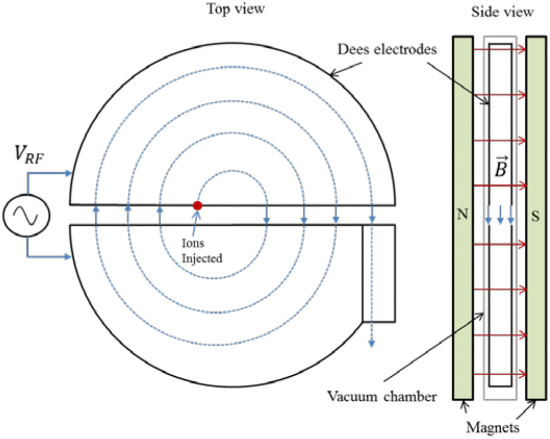
Al mismo tiempo, y especialmente cuando los haces colisionantes se volvieron importantes, había un deseo de obtener corrientes de haz cada vez más altas. En las últimas cuatro décadas, ha habido una demanda constante de expandir esta tecnología a otras aplicaciones de aceleradores, como la producción de rayos X, necesidades médicas, implantación de iones, fuentes de espalación, etc.

Gran parte del material presentado en esta introducción está bien cubierto y con más detalle en las siguientes referencias [21] - [22] , [23] y [24] .

**SECCION IV.**

## **Ciclotrones**

Fue en 1929 que Ernest Lawrence, de 27 años, tuvo la primera idea del ciclotrón y en 1931, con su estudiante graduado Stanley Livingston, Lawrence proporcionó la primera demostración experimental del principio del acelerador resonante [4] . Un ciclotrón clásico está compuesto de dos electrodos huecos en forma de D, los dees, donde se aplica un voltaje de RF para acelerar los iones. La aplicación del campo magnético uniforme y orientado verticalmente produce un movimiento circular en el que las partículas de la fuente de iones central se aceleran continuamente de un lado a otro. Las partículas se extraen por extracción cuando están en el último giro o mediante deflectores electrostáticos que eliminan las partículas de la última órbita [25] . Fig. 3 muestra una vista esquemática del principio clásico del ciclotrón.

[[](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-3-source-large.gif)](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-3-source-large.gif)

**Fig. 3.**

Vista esquemática del principio clásico del ciclotrón.

[Ver todo](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

La frecuencia angular de la revolución de una partícula con masa efectiva γmetro0 0 y cargar q moviéndose con velocidad v inducción normal a magnética si es

ω = qsiγmetro0 0(1)

Ver fuenteRight-click on figure for MathML and additional features.La fuerza de Lorentz qv B perpendicular a ambos v y si produce movimiento circular con un radio de curvatura R:

R = vω= γmetro0 0vqsi(2)

Ver fuenteF= ω / 2 πes la llamada frecuencia de ciclotrón a la que la frecuencia del voltaje de aceleración debe ser igual o un múltiplo entero de la misma. Siq es constante si uniforme, y mientras γ∼ 1 entonces la frecuencia del ciclotrón Fpermanece constante, independiente de la velocidad de las partículas y se cumple el isocronismo. En ese caso, no es necesario ajustar la frecuencia de RF del voltaje de aceleración a medida que la partícula gana energía. Además, el radio de la órbita aumenta en proporción a la velocidadv, de modo que la órbita tome la forma de una espiral.

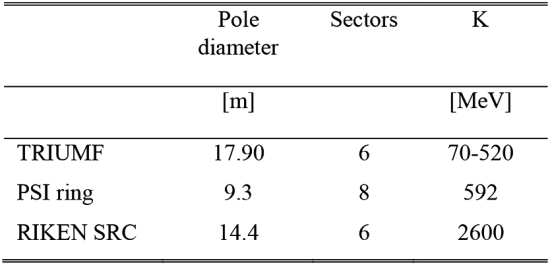
La aceleración resonante magnética es la base de los aceleradores circulares y, aunque el concepto original de campo constante y frecuencia fija ha exhibido algunas propiedades esenciales, el ciclotrón clásico tiene limitaciones importantes, como la masa inercial. γmetro0 0 no permanece constante, como se supone, sino que aumenta en proporción al factor relativista de la partícula γ.

Las modificaciones para compensar la pérdida de isocronismo han dado lugar a tres tipos de acelerador:

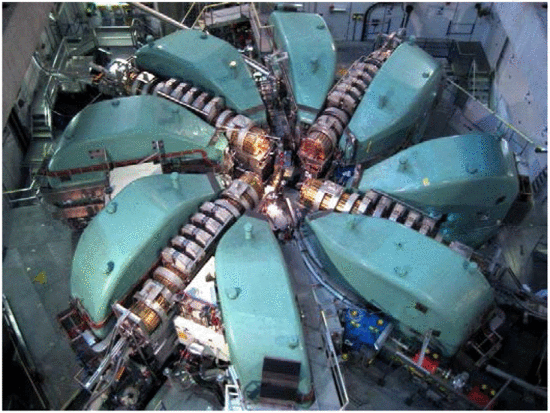
* Synchrocyclotrons, where the RF frequency is modulated to match the decreasing angular frequency ω at higher energies (at the expense of pulsed operation and low beam intensity). Currently, only a few large synchrocyclotron are in use for physics application, largely because of their low beam intensity;
* Isochronous cyclotrons, where the field strength B is radially increased to recover isochronism, CW operation and high beam intensity. Varying B results in axial defocusing and in order to compensate for this effect, the so-called flutter is introduced, wherein the magnet is split into radial or spiral sectors to create extra focusing forces. These kinds of cyclotrons are sometimes called azimuthally varying-field (AVF) which can also be built with separated-sector. In this case they are called separated-sector cyclotrons (SSC).
* Fixed-field alternating-gradient (FFAG) accelerators, where the RF frequency is usually modulated and the magnet is broken into sectors.

Modern cyclotrons that are able to reach higher energy, particularly those designed for high intensity, are typically realized as separated-sector cyclotrons. Some parameters of large cyclotrons operating today are listed in Table I where K-value is used to rescale the achievable kinetic energy per nucleon for varying charge-to-mass ratio. TRIUMF is the cyclotron with the physically largest pole diameter [26]. It accelerates H-ions and allows the extraction radius to be varied to adjust the final beam energy. The RIKEN cyclotron complex [27]permite acelerar una amplia variedad de iones y el RIKEN SRC es la máquina de iones pesados ​​más reciente y potente. La característica especial del ciclotrón RIKEN SRC son los imanes del sector superconductor, que ofrecen una resistencia a la flexión muy alta, reflejada por el valor K correspondiente. El ciclotrón PSI Ring fue propuesto en la década de 1960 por Willax [28] . Está especializado para la aceleración de protones de alta intensidad a expensas de una flexibilidad reducida y en realidad tiene el récord de potencia del haz (1.3 MW) en cualquier tipo de acelerador de protones [29] .

**Tabla I** Ciclotrones de anillo de sector separado grande

[[](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-table-1-source-large.gif)](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-table-1-source-large.gif)

Para alcanzar energías de haz más altas (> 120 MeV ) a altas corrientes de haz (mA), generalmente se emplean disposiciones de ciclotrón de etapas múltiples, siendo la etapa de ciclotrón final (de alta potencia) de diseño de sector separado puro, es decir, ver la figura 4 . Estas máquinas tienen suficiente espacio disponible y utilizan un diseño de cavidad de espacio único con un alto valor Q y, por lo tanto, bajas pérdidas de pared para un voltaje de profundidad dado.

[[](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-4-source-large.gif)](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-4-source-large.gif)

**Fig.4.**

Vista superior del ciclotrón del sector separado por PSI. Hay ocho imanes del sector espiral y cuatro cavidades de RF.

[Ver todo](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

La forma profunda original ahora se usa raramente y en todos los ciclotrones clásicos los dees son electrodos capacitivos colocados en el espacio magnético, mientras que la parte inductiva es una línea de transmisión en corto que se extiende fuera del yugo del imán. En este contexto, los dees se convierten en la impedancia característica baja y abierta, parte de unλ / 4línea coaxial Los diferentes diseños de cavidades dependen de las especificaciones y el diseño geométrico de un ciclotrón y, por lo tanto, se pueden agrupar y diferenciar por las propiedades electromagnéticas y geométricas. La figura 5 muestra una cavidad coaxial de doble espacio convencional que cubre un rango de frecuencia de 17 a 45 MHz mediante placas de cortocircuito móviles utilizadas en RIKEN SSC [30] . La figura 6 muestra una sección transversal (izquierda) de la nueva cavidad PSI de cobre de un solo espacio con una frecuencia de resonancia de 50,63 MHz [31] . La figura 7 muestra el esquema del resonador acelerador (tipo I) utilizado en RIKEN SRC [32]. Es un tipo de espacio único y la frecuencia de resonancia se puede sintonizar de 18 MHz a 40.5 MHz ajustando dos paneles de aleteo (A) y sintonizando finamente insertando los sintonizadores de bloque (D).

**Fig.5.**

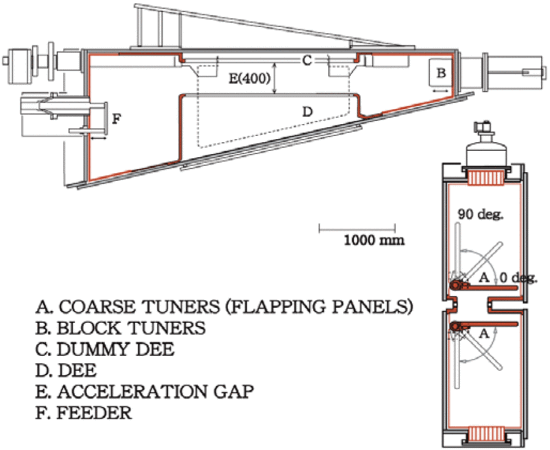
Diseño de la λ / 2cavidad de doble espacio de la RIKEN ssc. La posición vertical de las placas de cortocircuito se ajusta para la sintonización gruesa en el rango de 17 mhz a 45 mhz.

[Ver todo](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

**Fig.6.**

Sección transversal de la cavidad PSI (izquierda) y una imagen de toda la estructura (derecha).

[Ver todo](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

[[](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-7-source-large.gif)](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-7-source-large.gif)

**Fig.7.**

Esquema del resonador de aceleración (tipo i) para RIKEN src.

[Ver todo](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

Se pueden encontrar más detalles sobre los tipos de cavidades de aceleración para ciclotrones en las referencias [33] y [34] .

En los ciclotrones, el rango de las frecuencias de operación es de 2 MHz a 200 MHz y los amplificadores de potencia se pueden dividir en frecuencias de operación variables y fijas, respectivamente. El primero necesita sintonización de frecuencia remota a través de circuitos adicionales y generalmente está disponible en el mercado de transmisión comercial: en el rango de onda corta de 6 MHz a 26 MHz o en el rango bajo de la tecnología de transmisión VHF. Los amplificadores de frecuencia variable están disponibles en un amplio rango de potencia de hasta varios cientos de kilovatios, tienen una alta confiabilidad y se garantiza la disponibilidad a largo plazo de repuestos. Los amplificadores de frecuencia fija también se pueden encontrar en el mercado de transmisión comercial o, como alternativa, se pueden construir a medida de fabricantes comerciales o diseñar y construir por un laboratorio.

Los amplificadores de potencia pueden estar compuestos de componentes discretos LC, generalmente en circuito de cátodo conectado a tierra o diseño de amplificador concéntrico coaxial en circuito de rejilla conectado a tierra [35] . La figura 8 muestra el amplificador de RF SRC RIKEN basado en dos tetrodes con un circuito de red conectado a tierra [36] .

**Fig.8.**

Diagrama simplificado del circuito amplificador de RIKEN src.

[Ver todo](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

Las etapas del controlador de hasta 10 kW están hechas con tecnología de estado sólido, mientras que los tetrodes de potencia del mercado de comunicaciones se usan en las etapas finales como componentes de amplificación activos. Los tetrodes son refrigerados por aire o agua y su vida útil es de más de 18000 horas de funcionamiento. La ganancia de potencia es de aproximadamente 13 dB en la configuración de red conectada a tierra con una alta eficiencia del 60-70% y se mide en una banda ancha y50 Ω  carga.

The principal control solutions are the feedback loops measuring the slowly drifting parameters and adjusting the RF settings accordingly. The amplitude loop controls the cavity voltage and can also include the pulsing/ramping option. Typical stability values that can be obtained are less than 200 ppm. The frequency tuning loop uses different actuators, such as stepping motors used for coarse tuning when the controlled element is not continuously moved or in alternative hydraulic actuators for fast and continuous corrections. The phase loop is necessary if cyclotrons have two or more independent RF plants (cavity and amplifier system) or if multi-stage cyclotron arrangements are employed. In this case, phase noise can be less than 0.05∘ppm.

Two interesting books related to the long history of cyclotrons used for a wide range of medical, industrial and research applications are in references [37] and [38].

### A. Outlook

La historia de los ciclotrones ahora se extiende por un período de 85 años y los más grandes sirven como fuentes importantes de protones, neutrones, piones, muones e iones pesados ​​para la física de partículas, materia nuclear y materia condensada. Además, existe un amplio mercado para ciclotrones pequeños para la producción de radioisótopos y ciclotrones de protones utilizados para aplicaciones médicas. En futuras aplicaciones de ciclotrones, la disponibilidad y la fiabilidad se convierten en problemas muy importantes y los sistemas de RF tienen un papel importante en este aspecto. El diseño de RF sigue siendo un campo muy emocionante, abierto a nuevas ideas y conceptos, especialmente en vista de las nuevas herramientas para dinámicas de haz avanzadas y simulaciones electromagnéticas que han estado disponibles en el último período. Los nuevos campos para aplicaciones de ciclotrón ya incluyen ciclotrones médicos superconductores compactos e incluso ciclotrones superconductores que también utilizan cavidades RF superconductoras. En estas aplicaciones, las descargas en las cavidades de RF que causan fallas en el haz deben minimizarse y, como consecuencia, los estudios del mecanismo de ruptura de voltaje y los fenómenos de multipactorización son cada vez más importantes. Es de esperar que un objetivo estratégico de estas investigaciones sea una reducción en el número de disparos del haz debido a los sistemas de RF. Sin embargo, al mismo tiempo, los ciclotrones deberán diseñarse con mayor eficiencia para reducir los costos operativos. Otro desarrollo importante y aspecto futuro de los ciclotrones será la reducción de los materiales activados producidos durante la fase de desmantelamiento del ciclotrón.

**SECCION V.**

## **Aceleradores Lineales**

El desarrollo de aceleradores lineales comenzó con un aparato desarrollado por G. Ising [1] . El primer acelerador lineal fue demostrado por Wideröe [2] . Aceleró los iones de sodio y potasio hasta 50-KeV usando un acelerador de tubo de tres derivaciones a 1 MHz. La tecnología Linac se demostró con éxito en este trabajo inicial, pero el desarrollo fue lento debido a la ausencia de fuentes de RF de alta potencia y alta frecuencia. Inspirados por el trabajo de Wideröe, Sloan y Lawrence [2] , [3] y [4] desarrollaron una versión mejorada del linac. Tenía 30 tubos de deriva e iones de mercurio acelerado hasta 1.26-MeV. El linac fue conducido a 7 MHz con un oscilador casero. Una serie de pequeños aceleradores lineales se desarrollaron en la década de 1930[39] .

En las décadas de 1920 y 1930, comenzó la investigación sobre dispositivos electrónicos de alta frecuencia y alta potencia en envolventes de vacío, cuyo éxito finalmente abrió el camino para el desarrollo de aceleradores lineales (linacs) de muy alta potencia.

En 1921, AW Hull [40] demostró el concepto de magnetrón para generar oscilaciones de radiofrecuencia en los Laboratorios General Electric en Schenectady, Nueva York. El magnetrón multicavidad fue patentado en Alemania y Estados Unidos por Hans Hollman en 1938 [41] . Aleksereff y Malearoff desarrollaron en Rusia el primer diseño exitoso de magnetrón multicavidad adecuado para la generación de cantidades significativas de energía de micro ondas en 1936-37 y los resultados se publicaron por primera vez en 1940 [42] . El primer magnetrón con un ánodo externo fue demostrado por Randall y Boot a fines de 1939 [43] .

El concepto de modular un haz de electrones a través de múltiples cavidades para desarrollar alta potencia a altas frecuencias fue perseguido en la década de 1930 por los hermanos Russell y Sigurd Varian [7]. Su concepto, que se conoció como el klystron, se desarrolló aún más en colaboración con WW Hansen y sus estudiantes graduados de la Universidad de Stanford. El desarrollo del klystron se benefició del esfuerzo por desarrollar un radar para detectar aeronaves durante la Segunda Guerra Mundial, al igual que los tubos de electrones de alta potencia. Al final de la Segunda Guerra Mundial, la capacidad de los klystrons para generar alta frecuencia y alta potencia había avanzado lo suficiente como para permitir la construcción de linacs con una energía significativamente más alta. Los klystrones modernos y las variaciones de la cavidad acoplada y los tubos cuadriculados están disponibles comercialmente de varias fuentes internacionales que pueden suministrar 40-50 megavatios de potencia pulsada y alrededor de 1 megavatio de potencia CW en una amplia gama de frecuencias de microondas.

El primer acelerador lineal de electrones de guía de onda cargado en disco fue operado en la Universidad de Stanford en 1947 [44] . Tenía aproximadamente tres pies de largo con 38 celdas, un cuarto de longitud de onda de distancia. La fuente de microondas era un magnetrón Raytheon HK-7T. Esto se conoce como el acelerador Mark I ( Fig. 9 ).

[[](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-9-source-large.gif)](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-9-source-large.gif)

**Fig.9.**

La primera sección del primer acelerador lineal de onda viajera de Stanford es llevada por Ww Hansen (derecha) y tres de sus estudiantes de posgrado (de izquierda a derecha) S. Kaisel, C. Carlson y W. Kennedy.

[Ver todo](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

Klystrons that generated 20-MW pulses for 1-microsecond at 2.86-GHz were successfully used in the next linear accelerator, MARK II, at Stanford University in 1951 [45]. The Mark II was about 10-feet long and was the prototype for the Mark III, which was 214-feet long and used 21-klystrons. The electron energies in Mark III reached 730-MeV. The Mark IV was a prototype for the SLAC 2-mile long linac that is currently in operation for the LCLS coherent X-ray source [46] and [47].

In the early 1950's, Luis Alvarez and a team of scientists at Berkeley built a proton linear accelerator that was basically a 40-foot long TM010 cylindrical RF cavity with drift tubes that shielded the particle beam from decelerating fields when the RF field reversed polarity [48]. They injected protons from a 4-MeV Van de Graff accelerator and accelerated them to 31.5-MeV. They were able to use high-power gridded electron vacuum tubes that were developed for radar systems as part of the war effort. Two major improvements were made to the Alveraz Linac: the outer vacuum wall was made of copper plated steel, eliminating a separate copper liner; and Smith and Gluckstern suggested the concept of putting quadrupoles inside the drift tubes to provide radial focusing to overcome the defocusing due to the rising field in passing through the accelerating gaps [49].

The Alvarez concept was the baseline for the injector linac of the 6.2-GeV, weak-focusing synchrotron at Berkeley [50]. The drift-tube concept of the Alvarez Linac was limited in achieving high energies because the shunt impedance decreases to where the drive power becomes very large and it becomes economically unfeasible. However, the low emittance and good energy resolution of the beam make them ideal as injectors for high-energy synchrotrons. A significant number of synchrotrons have been built using the Alvarez linac concept with output energies from 20 to 200-MeV. Early examples include the Nimrod, 7-GeV synchrotron in the UK [51]; the 28-GeV proton synchrotron at CERN in Switzerland [52]; the 33-GeV AGS at Brookhaven National Laboratory in New York [53]; the 12-GeV ZGS at Argonne National Laboratory in Illinois [54]; the Fermilab 200-GeV synchrotron in Illinois [55]; the 3-GeV synchrotron, Saturne, at CEA in France [56]; and the 76-GeV synchrotron at IHEP in Russia [57].

El Laboratorio Nacional de Los Alamos desarrolló el linac SCC de células de acoplamiento lateral en la década de 1960 que permitió elevar la energía máxima de las linacas de protones a 800 MeV [58] . El tubo de deriva Alvarez linac comienza a ser ineficiente para energías superiores a 100-200 MeV. Se utiliza un rayo de un tubo de deriva de 100 MeV linac en LAMPF como el inyector para un LCC de tanque múltiple SCC. Cada tanque opera a 802.5 MHz y está en fases para igualar el aumento en la velocidad de las partículas. La energía final es de 800 MeV con un haz de 1 mA. El factor de trabajo fue del 6% cuando se construyó por primera vez [59] .

Kapchinskii [60] sugirió una innovación que permitió reemplazar los inyectores de CC de alto voltaje Cockcroft-Walton para linacs, y fue desarrollada y adoptada por científicos de Los Alamos [61] . El dispositivo, el cuadrupolo de radiofrecuencia, o RFQ, proporcionó un enfoque y una aceleración superiores en una superficie mucho más pequeña que la necesaria para los inyectores de CC de alto voltaje. El haz en una RFQ es acelerado y enfocado por los campos en la estructura en una etapa crítica de aceleración donde la carga espacial afecta más al haz, por lo tanto proporciona haces de emisión más bajos.

En la década de 1970, se inició la instalación de iones pesados ​​en Darmstadt. Fue diseñado con varios sistemas de aceleración para acelerar una variedad de especies de iones [62] . El extremo de mayor energía del linac es una combinación de una sola célula y un solo amplificador, que funciona a 108 MHz. La potencia de salida máxima es de 180 kW a partir de tubos de vacío y rejilla. El ciclo de trabajo es variable hasta un 25%, dependiendo de la especie iónica.

A principios de la década de 1960, la investigación se realizó en RF superconductora para aceleradores lineales en la Universidad de Stanford. El equipo de Stanford demostró el primer haz con plomo electrochapado como material superconductor. Eventualmente dirigieron su investigación al uso de Nb debido a sus cualidades superiores. Su trabajo fue la base sobre la cual se desarrollaron los aceleradores lineales superconductores [63] . Banford y Stafford sugirieron que un acelerador lineal de protones superconductores era factible en 1961 [64] .

A finales de la década de 1960, el grupo de Karlsruhe estaba desarrollando cavidades Nb para la aceleración de iones pesados [65] . A diferencia de las cavidades electrónicas de linac, que trataban con electrones cercanosβ= 1 ( β≡ ν/ c ), tuvieron que unir partículas muy lentas con muy bajas β. Estas primeras cavidades eran estructuras helicoidales. Se desarrollaron cavidades de anillo dividido que tenían mejor frecuencia y estabilidad de fase [66] . Se desarrollaron resonadores de cuarto y media longitud de onda a 4.2 K para mejorar la instalación de iones pesados ​​ATLAS superconductores en el Laboratorio Nacional de Argonne [67] .

Finalmente, los campos altos se lograron de manera confiable con cavidades Nb después de una extensa investigación en muchos laboratorios (Cornell, CEBAF, CERN, DESY, Saclay, Wuppertal y otros) en el tratamiento de la superficie que incluía pulido químico, enjuague a alta presión con agua y electro pulido [ 68] . Gran parte del trabajo de desarrollo para lograr una operación de alto campo en modo pulsado se realizó en el laboratorio DESY en Hamburgo [69] . Su investigación logró alcanzar altos gradientes de aceleración, casi hasta 50 MV / m en algunas cavidades, y resolvió muchos de los problemas relacionados con la desafinación de la microfonía y Lorentz.

Éxito en el desarrollo de cavidades de niobio superconductoras de alta calidad, básicamente operando con cavidades multiacopladas en el T M010modo, resultó en la construcción y operación exitosa del CEBAF CW, linac recirculante de electrones de corriente de haz alto en el Laboratorio Jefferson [70] . CEBAF ha actualizado recientemente sus instalaciones para poder operar a 12 GeV a 2 K. Hay 338 klistrones CW de 1500 MHz que manejan cavidades individuales con la capacidad de proporcionar 200 microamperios de corriente CW para la ciencia nuclear.

El último proyecto de linaca superconductora a gran escala es el acelerador de la fuente de neutrones Spallation en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge [71] . Funciona en modo pulsado con un ciclo de trabajo del 6%. La energía final es 1-GeV y puede entregar hasta 1-1.5 MW de potencia en un objetivo de espalación para la producción de neutrones para estudios de materia condensada. La sección superconductora consta de 81 cavidades de 6 celdas, cada una impulsada por un solo klystron de 402.5 MHz.

Estos primeros desarrollos han llevado a muchos proyectos importantes de linac y a actualizaciones en instalaciones más antiguas para diversas aplicaciones científicas en todo el mundo. Los linacs no solo se usan en grandes instalaciones, sino también en miles de linacs de baja energía. Algunos MeV se han utilizado ampliamente en el mundo comercial. Se utilizan para la irradiación de alimentos, la destrucción de patógenos para la esterilización médica, el depósito de calor en polímeros de reticulación para la envoltura retráctil sin dañar el producto o la envoltura, diagnósticos y tratamientos médicos, tratamiento de residuos y muchas otras aplicaciones industriales. Estos aceleradores son producidos comercialmente por grandes empresas en varios países [72] y [73] .

### A. Perspectiva

Los aceleradores lineales (linacs) tienen una amplia gama de utilidad en haz de partículas y aplicaciones comerciales. Es difícil cuantificar y predecir todos los desarrollos futuros de linac en este artículo, pero describiremos algunas tendencias importantes. La elección de la tecnología del acelerador depende del tipo de partícula que se acelerará, es decir, leptones, hadrones o iones, seguido de la elección de la frecuencia y la tecnología de funcionamiento (elección del sistema conductor o superconductor normal).

Los sistemas de frecuencia más alta podrían tener beneficios de costo sustanciales ya que frecuencias más altas permitirían gradientes más altos, lo que resultaría en aceleradores más cortos y costos de planta de energía más bajos. Para los sistemas de conducción y superconductores normales, los requisitos de tolerancia de fabricación mecánica establecen limitaciones prácticas. En el caso de las linacas de protones e iones, la elección de las limitaciones de frecuencia operativa también está dictada por la dinámica del haz. Por esta razón, los linacs de electrones generalmente están diseñados para funcionar a frecuencias más altas, típicamente banda S, mientras que los linacs de protones e iones usan frecuencias más bajas. Los linacs de protones de alta energía están diseñados para operar a diferentes frecuencias (frecuencias más altas a mayor energía), lo que compromete los requisitos de dinámica del haz, los costos del sistema y la optimización del tamaño.

A large number of operational linacs are based on normal conducting technology which generally have a lower construction cost. Normal conducting linacs are generally operated in pulse mode to manage the thermal issues associated with the normal conducting (e.g., copper) structures. In the past several decades, superconducting linacs have become viable alternatives for accelerator applications since superconducting linacs can operate in continuous wave (CW) mode at high gradients with significantly less dissipated power. The use of superconducting RF technology for high power linacs, such as those that are efficient drivers for spallation neutron sources, serve to increase their power efficiency and reduce beam loss. One of the most successful superconducting developments for accelerators is the TESLA 1.3 GHz cavities which are being fabricated in large quantities for the DESY FLASH and for the European XFEL project. These cavities are also being proposed for the SLAC LCLS-II as well as for the ILC baseline designs.

Normal conducting copper is well-established technology for pulsed electron linacs operating in S-band. The quest for higher gradient in recent years has triggered the development of accelerators based on C-band technology (e.g., SACLA and SwissFEL) as well as focused studies and prototyping of X-band accelerator systems for the CERN CLIC Project. Typical structures for pulsed machines are traveling wave since they offer a better tradeoff between power efficiency and gradient for short pulses.

For protons, standing wave structures are used and there are a variety of possibilities based on the choices of frequency and beam energy. While for electrons the same type of structures is adopted for the entire accelerator, proton or ion linacs are always composed of different types of structures, which are optimized for a particular energy range that takes into account beam dynamics requirements, power efficiency, and cost constraints. Since the superconducting structures become expensive at low energy, normal conducting linacs are preferred. At low energies an RFQ is the typical choice. For β(v/c)en el rango de 0.1 a 0.5, podrían usarse DTL u otras estructuras como CCDTL, SCL o ACS. A valores beta más altos, la tecnología superconductora ofrece una solución óptima que abarca cavidades de radios, HWR, QWR y estructuras elípticas.

Si bien no es posible dar una receta común, el diseño de futuras máquinas deberá tener en cuenta los diferentes requisitos de aspecto de diseño en función de las especies de partículas y la energía del haz para aplicaciones específicas. La disponibilidad y el costo de la tecnología de generación de energía de RF es un factor importante a considerar. La eficiencia de todo el sistema de acelerador, así como las soluciones rentables, son cuestiones fundamentales que deben considerarse para el diseño y desarrollo de los sistemas linac de próxima generación.

**SECCION VI.**

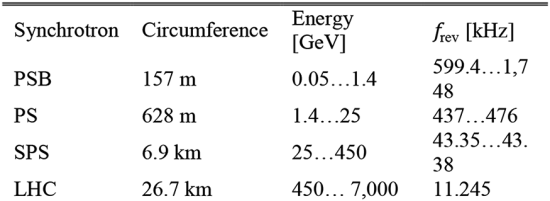
## **Máquinas circulares**

### A. Sincrotrones de protones

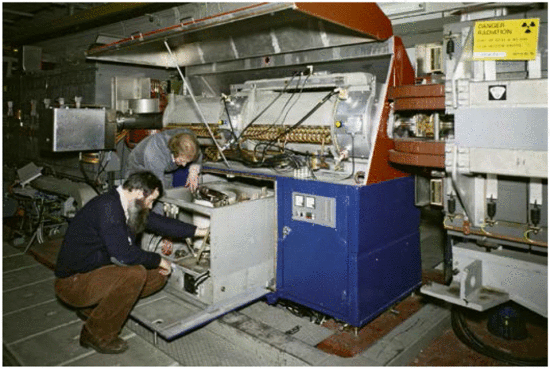
La historia de los sincrotrones se remonta a la década de 1940. La tecnología de sincrotrón experimentó un crecimiento significativo con la invención de un enfoque fuerte unos diez años después. AGS de Brookhaven y PS del CERN marcan este desarrollo y ahora tienen más de 50 años. El concepto de sincrotrones no ha cambiado fundamentalmente desde: las partículas cargadas se aceleran con un campo eléctrico de RF longitudinal; mientras las partículas ganan energía, cambian su velocidad y su impulso; el campo magnético en los dipolos principales se incrementa proporcionalmente al impulso para mantener las partículas en la misma órbita; la frecuencia del campo de RF aumenta proporcionalmente a su velocidad; Una red de enfoque asegura que las partículas fuera de momento no se pierdan. La frecuencia de RF es (con solo unas pocas excepciones) un armónico de la frecuencia de revolución.

La velocidad de las partículas (βC) depende de su energía (γm c2) como β= 1 - γ- 2------√ y asintóticamente se acerca a la velocidad de la luz C durante la aceleración, mientras que su impulso aumenta a medida que βγ. Esto lleva al requisito en los sincrotrones de rango de energía más bajo de que la oscilación de frecuencia durante la aceleración es grande, a menudo superior a 1 octava desde la inyección hasta la energía máxima (véase la  Tabla II ). Los grandes sincrotrones de energía pueden operar a una frecuencia prácticamente fija.

**Tabla II** Rango de energía del sincrotrón de protones cern

[[](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-table-2-source-large.gif)](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-table-2-source-large.gif)

Un ejemplo de un sistema de RF sincrotrón de baja energía se muestra en la Fig. 10 , el sistema de RF "caballo de batalla" del sistema PS 10 MHz del CERN. Es una cavidad de doble espacio, cargada de ferrita, con su amplificador de tetrodo directamente debajo.

[[](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-10-source-large.gif)](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-10-source-large.gif)

**Fig.10.**

CERN ps 10 mhz cavidad (h =7...21) instalado en 1971. Se instalaron diez sistemas, rango de frecuencia 2.7–10 mhz con 2 espacios por cavidad y 10 kv por espacio. El amplificador Tetrode se encuentra directamente debajo. Foto 1982 CERN.

[Ver todo](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

Para lograr el barrido de la frecuencia de resonancia de la cavidad durante el ciclo de aceleración, las ferritas magnéticamente blandas pueden magnetizarse mediante una corriente de polarización de CC cambiante en un circuito alrededor de ellas, como se ilustra en la figura 11 .

**Fig.11.**

Schematic of a ferrite loaded cavity; the bias current allows changing the magnetization of the ferrites, which in turn changes the effective permeability and thus the resonance frequency.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

The magnetization determines the permeability μ of the ferrite material, which in turn determines the resonance frequency of the cavity. A large bias current will magnetize the ferrites up to saturation, which results in a small RF permeability, consequently a smaller inductivity in the equivalent circuit and thus a larger resonance frequency. Typically the bias current loop is designed such that it decouples from the RF circuit, e.g., by the figure eight loop indicated in Fig. 11. The tuning range of ferrite-loaded cavities is typically 1 to 2 octaves.

El concepto de estabilidad longitudinal es esencial para los sincrotrones y denota el hecho de que las partículas que llegan un poco antes o más tarde que el centro de un grupo ven una fuerza que las enfoca hacia el centro del grupo; esto conduce a una oscilación longitudinal denominada "oscilación sincrotrón". La frecuencia de esta oscilación, la "frecuencia de sincrotrón", normalmente es mucho más pequeña que la frecuencia de revolución. Mientras que con poca energía, dondeβ sigue siendo una función fuerte de γ, las partículas que llegan tarde deben ver un campo de aceleración más grande para ganar velocidad para alcanzar al grupo. La situación se convierte en lo opuesto a gran energía: dondeβes solo una función débil de la energía. A una energía mayor, las partículas toman una trayectoria un poco más larga en el enfoque del sincrotrón, por lo tanto, las partículas que llegan tarde deben ver un campo de aceleración más pequeño para disminuir su impulso y tomar una órbita más corta para alcanzar al grupo. Existe una energía característica para cada sincrotrón donde estos dos efectos se cancelan exactamente; Esta energía se llama energía de transición, en la cual no se puede garantizar la estabilidad longitudinal.

A energías superiores o inferiores a la transición, la estabilidad longitudinal se obtiene colocando el centro del grupo en la pendiente de la oscilación sinusoidal de RF, con la complicación de que para un sincrotrón, en el que la energía de transición se pasa realmente durante la aceleración, la fase de RF tiene que se conecte a esta energía de modo que se asegure una fase estable antes y después del cruce de transición.

La figura 12 fue tomada durante la puesta en marcha del CERN PS el 24 de noviembre de 1959, cuando se intentó por primera vez este cambio de fase. Muestra de izquierda a derecha: John Adams, Hans Geibel, Hildred Blewett, Chris Schmelzer, Lloyd Smith, Wolfgang Schnell y Pierre Germain. La anécdota dice que Wolfgang Schnell implementó el interruptor de fase en una lata de café de metal y que funcionó en el primer intento.

[[](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-12-source-large.gif)](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-12-source-large.gif)

**Fig. 12.**

Puesta en marcha de la PS en noviembre de 1959. Wolfgang schnell (segundo desde la derecha) aseguró el interruptor de fase de RF que permitió el cruce de transición. (foto: 1959 CERN.)

[Ver todo](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

Tabla IIenumera los sincrotrones de protones CERN con los parámetros actuales. El haz del LHC pasa a través de todos estos sincrotrones a su vez. En uno o más ciclos magnéticos del sincrotrón de baja energía, se transfieren secuencialmente varios lotes de múltiples grupos al sincrotrón de mayor energía que espera en su energía de fondo plano. Como la frecuencia de revolución de la máquina de energía más alta es típicamente mucho más baja que la de la máquina de energía más baja, se usa un armónico más grande de la frecuencia de revolución en sincrotrones más grandes; el PSB usa armónicos 1, 7 a 21 se usan para la aceleración en los armónicos PS, y el número de armónicos 35640 se usa en el LHC. El armónico utilizado influirá en el tamaño y la propagación de energía de los racimos de protones en la transferencia, y, en general, se intenta dar forma al grupo en el espacio de fase longitudinal correctamente para colocarlo en el centro del cubo de la máquina de mayor energía. Obviamente, las frecuencias y fases de los sistemas de RF de ambas máquinas involucradas en esta transferencia deben controlarse exactamente; para la operación de lotes múltiples, debe llenarse el cucharón correcto.

Incluso si los principios fundamentales del sincrotrón no han cambiado en los últimos 50 años, los sincrotrones han avanzado tanto en energía como en intensidad. La primera limitación al aumentar la intensidad es el efecto de carga espacial a baja energía: las fuerzas de carga espacial dan como resultado diferentes fuerzas efectivas sobre partículas individuales, y esto conduce principalmente a una gran extensión de sintonía. Esto se puede aliviar un poco tratando de formar racimos largos y planos; esto se ha probado con éxito en el CERN PSB utilizando cavidades armónicas y más recientemente con cavidades de banda ancha (ver más abajo). El límite de carga espacial es muy fundamental, por lo que es la razón principal por la cual la energía de inyección de los sincrotrones aumenta para hacer frente a una intensidad significativamente mayor.

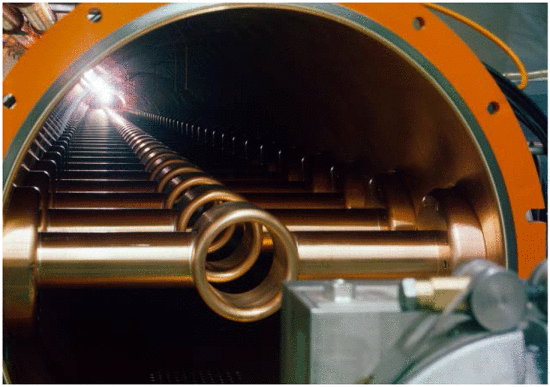
Otras limitaciones al aumentar la intensidad en un sincrotrón se deben a los efectos colectivos causados, por ejemplo, por la impedancia de la máquina. Estos efectos conducen a diversas inestabilidades del haz, crecimiento de la emisión y pérdida del haz. La impedancia aquí describe el voltaje inducido por el haz que pasa en el tubo del haz, sus discontinuidades, colimadores, pateadores, bridas de vacío y, por último, pero no menos importante, por las cavidades mismas. Los sincrotrones modernos de gran intensidad deben estar diseñados para tener una baja impedancia, pero por supuesto también hay límites prácticos. Tenga en cuenta que los racimos cortos tienen un amplio espectro de frecuencia y, por lo tanto, interfieren con los componentes de frecuencia de microondas de la impedancia, cuya parte real puede conducir a un calentamiento significativo de los elementos de la máquina.

Es posible hacer frente a la impedancia longitudinal intencionalmente grande de una cavidad de aceleración (en su frecuencia de resonancia) con una rápida retroalimentación de RF: una captación acopla una pequeña fracción de la señal de RF presente dentro de la cavidad, que luego se agrega con negativo firme a la señal de RF ordenada en la entrada de la cadena del amplificador de RF. Es fundamental diseñar este bucle de retroalimentación avanzado para la estabilidad, que para una retroalimentación de RF está limitada por el retraso del grupo dentro del bucle de retroalimentación, es decir, la distancia física entre la cavidad y la cadena del amplificador. Muchos viejos sistemas de RF sincrotrón han sido adaptados con circuitos de retroalimentación de RF respetando estas limitaciones. La impedancia de la cavidad (diseñada para ser grande para crear un voltaje de aceleración grande con potencia de RF moderada) se puede reducir efectivamente por la ganancia de retroalimentación

Si la impedancia de una máquina no puede reducirse aún más, todavía se puede intentar reducir su efecto en el haz. Por esta razón, se pueden usar cavidades armónicas, como se describirá a continuación.

En lo que respecta al alcance de energía de los sincrotrones, describiremos aquí brevemente los sistemas de RF del SPS y el LHC. Sin embargo, debe decirse que estos dos sistemas no son fundamentalmente diferentes de los sistemas de RF linac debido al tamaño de la máquina y al hecho de que la velocidad de las partículas es esencialmenteC, entonces son sistemas de frecuencia fija. El sistema SPS de 200 MHz consta de estructuras de ondas viajeras conductoras normales y el LHC de 400 MHz de cavidades de ondas estacionarias superconductoras.

La figura 13 muestra una vista dentro de una de las cuatro cavidades de onda viajera de 200 MHz del CERN SPS. La estructura periódica consiste en barras transversales; el avance de fase por celda esπ/ 2 [74] .

[[](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-13-source-large.gif)](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-13-source-large.gif)

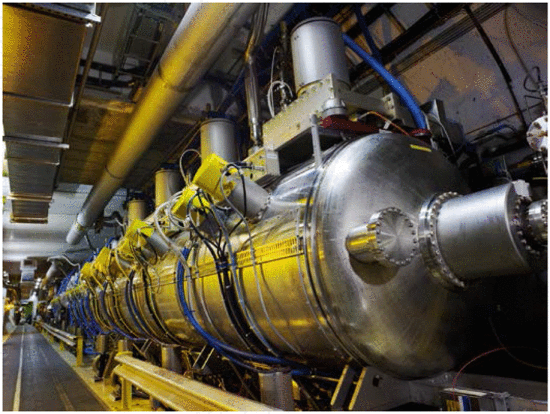
**Fig.13.**

Vea el interior de la cavidad de onda viajera SPS abierta de 200 mhz. (foto: 1978 CERN.)

[Ver todo](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

La ventaja de la estructura de onda viajera es que no se necesita un circulador de entrada: la coincidencia de entrada es independiente de la carga del haz. La cavidad se puede operar con una carga de haz variable y muy grande y una eficiencia muy alta (carga de haz completo). La estructura de onda viajera no tiene comportamiento de resonancia. Operar fuera de su frecuencia nominal solo conducirá a un deslizamiento de fase entre haces; Esto da como resultado un ancho de banda considerable. Este último se usa en el SPS para acelerar iones pesados, que aún son sustancialmente más lentos queC.

El sistema LHC RF se basa en cavidades de células individuales superconductoras operadas a 400 MHz [75]. Las cavidades se fabrican con chapa de cobre, un proceso bien entendido, y finalmente se pulverizan desde el interior con una capa delgada de Nb. La ventaja de esta técnica, que se desarrolló originalmente para el sistema LEP grande (ver más abajo), es que la buena conductividad térmica del cobre igualará rápidamente la distribución de temperatura si se produce un calentamiento local causado por un defecto de la superficie o una impureza; esto retrasa el inicio de un enfriamiento rápido significativamente y, por lo tanto, reduce la sensibilidad a las impurezas. Las cavidades LHC de 400 MHz se fabrican utilizando esta técnica. Un criostato contiene 4 cavidades individuales, cada una equipada con su tanque de helio, sintonizador, amortiguadores HOM y acoplador de potencia variable. Se instalan un total de 16 cavidades (4 criostatos) en el LHC (cf.  Fig. 14), 8 para cada viga. Se operan con un gradiente de aceleración relativamente modesto de 5.5 MV / m, lo que resulta en un voltaje de aceleración total de 2 MV por cavidad o 16 MV por haz.

[[](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-14-source-large.gif)](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-14-source-large.gif)

**Fig.14.**

Módulo de cavidad superconductora LHC de 400 mhz instalado en el punto 4 del LHC. Dieciséis cavidades, agrupadas en 4 criomódulos, aceleran las vigas 1 y 2 hasta 16 mv. Foto 2007 CERN.

[Ver todo](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

### B. Máquinas Lepton

#### 1. 1) altas pérdidas de radiación sincrotrónica

En las máquinas circulares, en cada turno, las partículas de alta energía pierden una parte de su energía a través de la emisión de radiación sincrotrón, principalmente en los imanes de flexión, pero también en dispositivos de inserción magnética dedicados como las fuentes de luz sincrotrón. La energía perdida por turno en una máquina de anillo isomagnético se puede calcular como:

U0 0= Kr a dγ4 4/ ρ,(3)

Ver fuenteRight-click on figure for MathML and additional features.con Kr a d= 6.03 10- 15 MeV . metro, γ= E / E0 0 La relación de la energía de partículas E y su energía en reposo mi0 0y ρel radio de curvatura en la máquina isomagnética [76] . Es fuerte para los electrones de luz conmi0 e= 0.511 MeV  energía de reposo y en su mayoría insignificante para los protones 1836 veces más pesados ​​con mi0 p= 938 MeV descansar la energía. En el colisionador de positrones de electrones más grande jamás construido LEP conρ = 3026 m , a la energía máxima alcanzada de 104 GeV, es decir, γ= 203565, cada partícula perdió hasta 3420 MeV / vuelta. Esto se logró con un voltaje de RF de 3675 MV de 288 cavidades multicelulares superconductoras y 56 cavidades de Cu conductoras normales, es decir, bajo condiciones de haz cercanas al límite de vida útil cuántica [77] .

La aplicación [(3)](https://ieeexplore.ieee.org/document/#deqn3) al Gran Colisionador de Hadrones LHC en el CERN con un radio de curvatura de 2804 m conduce al sorprendente resultado de que en la máquina de mayor energía del mundo, los protones de hasta 7 TeV experimentan solo pequeñas pérdidas de radiación de sincrotrón de 6,7 keV / vuelta, es decir , por mucho menos que los electrones en los anillos más pequeños. Por lo tanto, el LHC tiene solo un sistema de RF comparablemente pequeño con dieciséis cavidades superconductoras de 400 MHz, ocho por haz, cada una alimentada por un klystron de 300 kW [78] .

El ejemplo del colisionador de positrones de electrones grandes (LEP) en el CERN muestra que se pueden obtener altas energías para los leptones solo al proporcionar un voltaje de radiofrecuencia extremadamente alto. Antes del desarrollo de la tecnología de RF superconductora, se logró la conversión eficiente de la potencia de radiofrecuencia en voltaje de aceleración maximizando la impedancia de derivaciónRsde cavidades de cobre resonantes, con el factor de calidad Q más alto posible, es decir, las pérdidas de RF más bajas posibles. En su primera configuración, el anillo LEP estaba equipado con 128 cavidades compactas de cobre de cinco celdas de 352,2 MHz (véase la  figura 15 ), basado en un diseño DESY de 500 MHz para el anillo PETRA. Las celdas acopladas magnéticamente se diseñaron con conos internos de la nariz para obtener un gran factor geométrico.Rs/ Q (140Ω / celda  dando 700 Ω / cavidad ) y el factor de calidad en esta frecuencia bastante baja se acercó a 40000. Cada cavidad de cinco celdas se acopló aún más a una cavidad de almacenamiento esférica en su parte superior con un factor Q de 160000 que se sintonizó de manera tal que al mismo tiempo excitaba los modos pares e impares de En la estructura acoplada, la energía latiría entre las dos cavidades a la frecuencia de repetición del grupo de 89 kHz. En total, se logró un factor de calidad efectivo de casi 64000, correspondiente al 35% de ahorro de energía [79] y [80] .

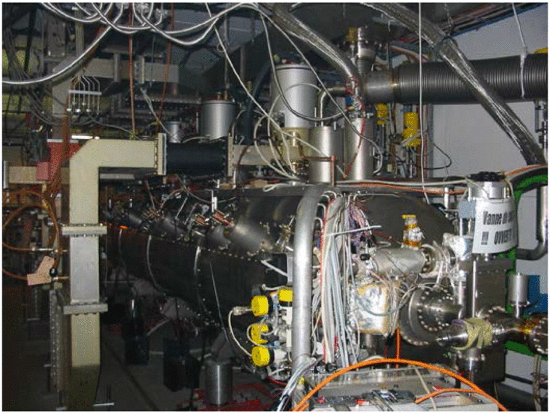
**Fig.15.**

CERN lep cavidad de cobre. (foto: 1989 CERN.)

[Ver todo](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

El voltaje nominal de 2.5 MV por cavidad, es decir, del orden de 1 MV / m, se obtuvo con una potencia de RF bastante modesta de aproximadamente 80 kW por conjunto de cavidad. De hecho, dos klystrons de 1 MW operaban a 600 kW, una frecuencia de latido separada entre sí, alimentaban una cadena de 16 conjuntos de cavidades [79] . A pesar de este elaborado esquema, de acuerdo con [(3)](https://ieeexplore.ieee.org/document/#deqn3) el aumento de la energía de las partículas de 55 GeV para LEP1 a 100 GeV para LEP 2 requirió un voltaje de RF mayor en un orden de magnitud. Esto no era práctico con la tecnología de cobre conductor normal.

Mientras tanto, el desarrollo de cavidades RF superconductoras había alcanzado un grado de madurez que permitió la actualización de LEP. A pesar de lo geométricoRs/ Q siendo menor en aproximadamente un factor de tres en comparación con la geometría optimizada del cono de la nariz, gracias a factores de calidad en el rango de 109 9 a 1010, se obtienen impedancias de derivación mucho más altas con cavidades superconductoras. El voltaje alcanzable todavía está limitado tecnológicamente principalmente por el campo máximo que las superficies toleran antes del enfriamiento. Para LEP 2, CERN desarrolló la tecnología de cavidades de cobre con un recubrimiento pulverizado Nb para obtener una superconductividad de RF a 4 K. Doscientas ochenta y ocho cavidades superconductoras de cuatro celdas que entregan 5 MV / m se implementaron con éxito en el anillo LEP y permitieron la rampa. de la energía de las partículas por encima de 100 GeV. Un cromódulo superconductor LEP se muestra en la Fig. 16. El colisionador LEP se hizo funcionar con un total de 8 racimos y una corriente total de 6 mA. A 100 GeV, esto correspondía a una potencia de haz de hasta 18 MW que el sistema de RF debía restaurar. Sin embargo, la intensidad estaba limitada por la inestabilidad de un solo grupo de TMCI a un máximo de 1 mA / grupo [81] .

[[](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-16-source-large.gif)](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-16-source-large.gif)

**Fig.16.**

LEP sc cryomodule. Foto 1989 CERN.

[Ver todo](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

#### 2. 2) anillos de almacenamiento de electrones y positrones

Consideremos ahora el caso de los anillos de positrones o electrones de menor energía en el rango de GeV para el almacenamiento de varios cientos de mA de corriente de haz, como para fuentes de luz de sincrotrón, o incluso algunos amplificadores como en las fábricas B. La primera fuente de luz de tercera generación ESRF, por ejemplo, opera un anillo de almacenamiento de electrones de 6 GeV, 844 m de circunferencia, con hasta 200 mA de corriente almacenada. Los electrones pierden entre 4,9 y 5,4 MeV por turno, dependiendo del cierre de la brecha de los onduladores que producen fotones a medida de 1 a 100 keV para la mayoría de las 39 líneas de haz, algunos de ellos con radiación de imán de flexión. En consecuencia, la potencia máxima del haz es∼ 1 MW mientras que solo unos 300 kW de potencia de RF se disipan en 5 cavidades de cinco celdas para obtener 9 MV de voltaje de RF. Este es un ejemplo de una máquina altamente cargada con haces como es el caso de muchas otras fuentes de luz circulares en el mundo.

Ahora se abordan brevemente algunos aspectos físicos básicos del haz que son relevantes para el diseño de un sistema de RF para anillos de leptones altamente cargados con haz.

#### 3. 3) oscilaciones de sincrotrón

Con su baja energía en reposo, los electrones o positrones ya son altamente relativistas cuando se inyectan en una máquina circular (por lo tanto, estas máquinas siempre funcionan muy por encima de la energía de transición). Las partículas son agrupadas por el voltaje de aceleración de RF alrededor de la fase síncrona.∅s, momento en el cual las cavidades de RF vuelven a acelerar una partícula hipotéticamente perfectamente sincronizada exactamente por la cantidad de energía perdida en cada giro:

s i n ∅s= U0 0/ eVa c c,(4)

Ver fuenteRight-click on figure for MathML and additional features.Va c c siendo el voltaje de aceleración pico, U0 0es la pérdida de energía por turno y la carga de la unidad. Mientras permanezcan dentro de la aceptación energética de la red y el sistema de RF, las partículas sin energía realizan oscilaciones de sincrotrón alrededor de esta fase síncrona, a la frecuencia del sincrotrón:

Fs= α fR FVa c cc o s ∅s2 πT0 0mi/ e------------√(5)

Ver fuenteRight-click on figure for MathML and additional features.con α = ( L / E ) d E / d L el factor de compactación de momento que mide el alargamiento de la órbita L con energía, FR F la frecuencia de RF, E la energía del anillo, y T0 0El período de la revolución. Para el anillo de almacenamiento 6 GeV ESRF, por ejemplo, la frecuencia del sincrotrón es de alrededor de 2 kHz paraα ≈ 1.84 10- 4. Una partícula que está rezagada por la fase.∅ detrás de la partícula síncrona realiza una oscilación armónica sincrotrón amortiguada en energía y fase de acuerdo con:

Δ E= [ E2 πFR Fsα] ∅˙(6)

Ver fuenteRight-click on figure for MathML and additional features.y

∅¨+ 2τs∅˙+ ( 2 πFs)2∅ = 0 ,(7)

Ver fuenteRight-click on figure for MathML and additional features.con el tiempo de amortiguación del sincrotrón τs y Δ E, la desviación de energía de la energía nominal E. Las máquinas de electrones y positrones se benefician de una amortiguación sustancial gracias a la emisión de radiación sincrotrón, debido al hecho de que las partículas de mayor energía emiten estadísticamente fotones más energéticos. Por ejemplo, el ESRF tiene un tiempo de amortiguación de sincrotrón de 3,6 ms. Al mismo tiempo, la emisión estadística de fotones también excita el movimiento sincrotrón y el equilibrio con la amortiguación conduce a una distribución casi gaussiana de partículas en el espacio de fase longitudinal. En el caso del ESRF, la propagación de energía rms natural esσmi/ E =1.06×10- 3 y la duración del grupo rms no afectado σt≈ 15PD. Tenga en cuenta que las máquinas de hadrones con sus pérdidas de radiación sincrotrón insignificantes tienen tiempos de amortiguación de sincrotrón casi infinitos y la distribución de partículas depende del historial de inyección.

#### 4. 4) Oscilaciones betatron

Hasta ahora hemos introducido oscilaciones de sincrotrón longitudinal que están directamente vinculadas a los sistemas de radiofrecuencia. Oscilaciones similares también tienen lugar en los planos horizontal y vertical horizontal: estas oscilaciones betatron están principalmente condicionadas por las fuerzas de enfoque transversales de la red magnética y están algo más allá del alcance de este artículo. Las oscilaciones betatron también están acopladas al plano longitudinal. La emisión cuántica de fotones en las secciones de energía dispersiva de las máquinas de leptones de la red magnética excita las oscilaciones betatron horizontales y al mismo tiempo proporciona amortiguación: el equilibrio produce dimensiones finitas del haz horizontal caracterizadas por la emisión horizontal de la red. La emitancia vertical resulta esencialmente del acoplamiento finito entre ambos planos transversales. Estas emisiones transversales son parámetros clave que determinan la luminosidad de los colisionadores o el brillo de las fuentes de luz sincrotrónicas. Muchas fuentes de luz de tercera generación, incluido el ESRF en Francia, la Fuente avanzada de fotones (APS) en los Estados Unidos y el SPring-8 en Japón, están en proceso de reconstruir sus anillos de almacenamiento con redes magnéticas altamente optimizadas para reducir el haz horizontal emiten de uno a dos órdenes de magnitud y proporcionan haces de fotones más brillantes y más coherentes a los usuarios.

#### 5. 5) coherent Oscillations

An observer, such as a beam pick up connected to an oscilloscope or a spectrum analyzer, or an element of the vacuum vessel that has a significant beam coupling impedance, would normally see homogenous stationary bunches of finite dimensions in all the directions passing by at almost the speed of light. Even if all the particles perform oscillations around the synchronous centered reference particle, these oscillations are generally incoherent, uncorrelated, and can therefore not be observed macroscopically.

Sin embargo, si se aplica una señal externa, los racimos comienzan a oscilar coherentemente en fase con esta excitación de acuerdo con [(7)](https://ieeexplore.ieee.org/document/#deqn7) , si se agrega un término de excitación no homogéneo. El grupo realiza oscilaciones rígidas del sincrotrón de masa en su conjunto si se excita cerca de la frecuencia del sincrotrón. También puede realizar oscilaciones de forma cuando se excita a múltiplos de la frecuencia de sincrotrón. De manera similar, en el espacio de fase transversal, se observan oscilaciones de cabeza y cola sincronizadas con betatron de varios órdenes. Además, si la máquina circular se llena con varios o muchos grupos, dependiendo de la frecuencia de excitación, los grupos realizan las llamadas oscilaciones de grupo acopladas coherentes con un cambio de fase dado

Δ φ = n 2 πh+ 2 πFsT0 0h+ k 2 π,(8)

Ver fuentede un cubo de RF al siguiente. Aquí se supone una oscilación del sincrotrón del centro de masa, h es el número armónico, es decir, el número de períodos de RF o cubetas por turno, n es el orden del modo de agrupamiento acoplado con valores entre 0 yh - 1 (hes el número armónico) yk es cualquier número entero. Tal modo de grupo múltiple n puede excitarse de manera resonante con un voltaje de RF a la frecuencia

Fnorte= Δ φ2 πTR F= n f0 0+ fs+ k fR F(9)

Ver fuentedónde TR F= 1 / fR F es el período de RF y F0 0= 1 / T0 0 es la frecuencia de la revolución Fs es la frecuencia sincrotrónica y FR Fes la frecuencia de RF Para un llenado uniforme de múltiples grupos de la máquina y una pequeña amplitud de excitación, el modo longitudinal de múltiples grupos n se muestra como un conjunto de bandas laterales de modulación de fase de primer orden positivas y negativas de los armónicos de RF:

Fnorte= k fR F± ( n f0 0+ fs) .(10)

Ver fuenteRight-click on figure for MathML and additional features.Este espectro se extiende hasta 1 / 2 σt, por ejemplo, aproximadamente 34 GHz para el ESRF. Se pueden escribir ecuaciones similares para los modos agrupados transversales acoplados. Sin embargo, para los propósitos de este documento, no desarrollaremos más la teoría de las oscilaciones coherentes del grupo y limitaremos algunos resultados que son importantes para el diseño de un sistema de RF.

#### 6. 6) inestabilidades controladas por el modo de orden superior (HOM)

La interacción de una banda lateral positiva de una oscilación longitudinal de múltiples grupos con la parte resistiva de una alta impedancia de acoplamiento de haz longitudinal produce un anti-amortiguamiento que es proporcional a la corriente del haz. Por el contrario, la interacción con una banda lateral negativa produce amortiguamiento adicional. Algunos modos de orden superior (HOM) de las cavidades de aceleración con altas impedancias longitudinales:

Z∥HO M= R∥HO M1 + j QHO M⌈ fFHO M- fHO MF⌉(11)

Ver fuenteRight-click on figure for MathML and additional features.puede conducir el haz inestable por encima de un umbral de corriente del haz yot h r e s h en el cual el anti-amortiguamiento de esta interacción cancela exactamente la constante de amortiguamiento natural 1 / τs cuando entran en resonancia con una banda lateral positiva. R/ /H O M, Q/ /H O M y FH O Mson la resistencia de derivación, el factor de calidad y la frecuencia de resonancia del HOM, respectivamente. El umbral para esta inestabilidad de racimo acoplado longitudinal (LCBI) viene dado por la fórmula bien conocida:

yo∥t h r e s h= 2 fsT0 0mi0 0/ eα τsFHO MQHO M[ R / Q ]∥HO M.(12)

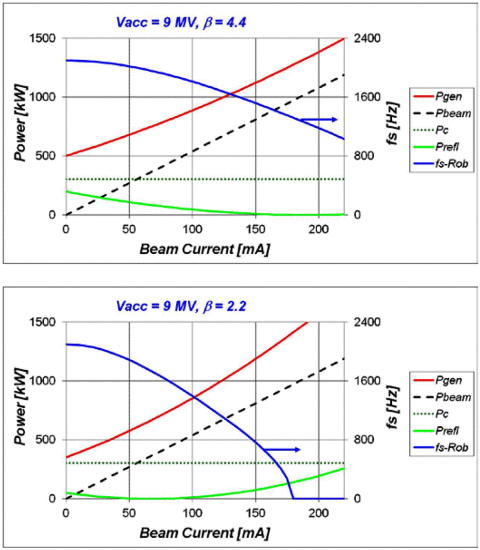
Ver fuenteDe manera similar, los umbrales para las inestabilidades transversales de racimo acoplado (TCBI) conducidos por HOM transversales están dados por

yo⊥t h r e s h= 2 T0 0mi0 0/ eβ⊥τ⊥QHO M[ R / Q ]⊥HO M,(13)

Ver fuentedónde β⊥ y τ⊥son la función beta en la ubicación de la cavidad y el tiempo de amortiguación betatron, respectivamente. Por encima del umbral, las oscilaciones de sincrotrón o betatrón crecen exponencialmente hasta que las partículas son expulsadas del área estable del espacio de fases y eventualmente se pierden. Dependiendo de los posibles efectos de saturación debido a las no linealidades, el haz puede mantenerse en el anillo pero con una gran explosión de energía o una emisión transversal fuertemente degradada. Tales degradaciones de la calidad del haz generalmente estropean la luminosidad de los colisionadores o el brillo de los haces de fotones en las fuentes de luz. En la Sección VIII-C , se abordarán en detalle los métodos para superar las inestabilidades impulsadas por HOM, especialmente para máquinas de alta corriente.

#### 7. 7) Haz de carga y efectos Robinson

Equation [(12)](https://ieeexplore.ieee.org/document/#deqn12) also holds for the interaction of the extremely high impedance of the fundamental accelerating mode with the LCBI of order n=0, i.e., the oscillation mode where all the bunches oscillate in phase. If the cavity resonance fres is tuned above the RF frequency fRF, such that the upper synchrotron sideband fRF+fs sees a substantially higher impedance than the lower sideband fRF−fs, the oscillation can become unstable at relatively low beam currents. This particular situation corresponds to the AC Robinson instability [82]. However, when beam is injected into a storage ring, an automatic cavity-tuning loop maintains the beam loaded accelerating mode impedance as seen by the generator. For this, the inductive component of the beam current is compensated by a corresponding capacitive component of the cavity impedance obtained by shifting fres below fRF, which is to the stable side according to the AC Robinson criterion. In other words, the automatic tuning loop guarantees stability. Note, however, that for a very large machine with a small revolution frequency, for high beam currents, fres may shift too close to fRF−f0 y trabajar como HOM para el LCBI de orden h - 1 (h es un entero)

[[](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-17-source-large.gif)](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-fig-17-source-large.gif)

**Figura 17.**

Carga de haz alto y efecto de CC robinson para el ejemplo del anillo de almacenamiento de electrones ESRF; los gráficos dan la potencia disipada en las cavidadesPAGC, el poder reflejado de las cavidades PAGr e fl, la potencia transferida a la viga PAGb e a m, la potencia del generador PAGg e ny la frecuencia del sincrotrón Fs - R o b para modo de grupo acoplado n = 0con todos los racimos oscilando en fase; (arriba) factor de acoplamiento de cavidad realβ= 4.4para funcionamiento combinado a la corriente nominal de 200 mA; (abajo) acoplamiento insuficienteβ= 2.2 : fs - R o b desaparece en el umbral de la inestabilidad de Robinson DC a 179 ma.

[Ver todo](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

Otra condición de estabilidad para máquinas con mucha carga de haz se conoce como el criterio de estabilidad DC Robinson [82] y [83] . De hecho, el modo de cavidad de aceleración es impulsado por dos generadores: la fuente de energía de RF externa y el haz almacenado. Con el aumento de la corriente del haz, el voltaje inducido por el haz también aumenta y el voltaje de RF total resultante es cada vez menos rígido frente a las oscilaciones del tren de racimo en su conjunto (en modo de racimo múltiplen = 0) Como se muestra en la Fig. 17 , la frecuencia del sincrotrónFs - R o b- para el modo n = 0disminuye cuando se inyecta el rayo en la máquina. Sin embargo, tenga en cuenta que la frecuencia de sincrotrón para oscilaciones de partículas incoherentes o para oscilaciones de racimo acopladas de orden superior no se ve afectada y permanece sin cambios.

Generalmente, los acopladores de potencia de las cavidades están configurados para un factor de acoplamiento

β= QQe x t,(14)

Ver fuentede modo que el generador de RF coincida con la corriente nominal, como, por ejemplo, para el anillo ESRF con los parámetros de la Fig. 17 (a) (arriba),Q y Qe x tsiendo los factores de calidad externos y descargados de la cavidad, respectivamente. El acoplamiento óptimo se obtiene de

βo p t= Pb e a mPAGC+ 1 ,(15)

Ver fuentedónde PAGb e a m y PAGCson la potencia transferida al haz y la potencia disipada en la cavidad, respectivamente [83] . Para cavidades superconductoras conPAGC≪ Pb e a m, y por lo tanto, βo p t≫ 1, el acoplamiento óptimo para un funcionamiento combinado con nortec a v cavidades se expresa mejor como

Qe x t , o p t= Va c c2nortec a v2 ( Rs/ Q)Pb e a m.(dieciséis)

Ver fuenteLa Fig. 17 (b) (abajo) muestra que la frecuencia de sincrotrón del modo 0 desaparecería por encima de un umbral de corriente dado si el acoplamiento se hubiera establecido demasiado bajo. Más allá de esta corriente, la frecuencia del sincrotrón se vuelve imaginaria, el sistema de RF pierde el control de la fase del haz y el haz finalmente se pierde por completo. Esta es la llamada inestabilidad de DC Robinson. La condición para la estabilidad es [82] , [83]

β≥ Pb e a mPAGC- 1 ,(17)

Ver fuenteque generalmente se cumple para las cavidades conductoras normales cuando el sistema de RF se dimensiona de acuerdo con [(15)](https://ieeexplore.ieee.org/document/#deqn15) . En la Fig. 17A (arriba), por ejemplo, la coincidencia ocurre a 67 mA mientras que el umbral de inestabilidad es de 179 mA. Para cavidades superconductoras, sin embargo, conPAGC≪ Pb e a m, la coincidencia y el inicio de la inestabilidad de DC Robinson ocurren casi con el mismo valor actual. Se requiere una retroalimentación de RF sofisticada para estabilizar el haz cuando se opera la máquina en condiciones coincidentes a la corriente nominal.

### C. Perspectiva

Es muy probable que los sistemas de RF para la próxima generación de máquinas circulares de emisión ultrabaja sean similares a los sistemas de RF de las máquinas existentes. El énfasis en la eficiencia energética, la confiabilidad de los sistemas y el menor costo de operación serían factores importantes a considerar para el diseño e implementación del desarrollo futuro del sistema de RF para cualquier máquina circular de próxima generación. Los estudios de diseño se lanzaron en 2014 para un Future Circular Colliders (FCC) con una circunferencia de 80 a 100 km. Informes de diseño conceptual para hasta 350 GeVe + e -el colisionador de leptones y un colisionador de hadrones de 100 TeV pp se están preparando para la próxima actualización de la Estrategia Europea para la Física de Partículas para 2018. El diseño de un sistema de RF rentable y altamente eficiente presentará un gran desafío, especialmente para el colisionador de leptones, con 50 MW de potencia radiada por haz. El diseño de los aceleradores de nueva generación se beneficiará de los desarrollos en la tecnología de cavidades y la generación de energía de RF como se discutió en las Secciones VIII y IX .

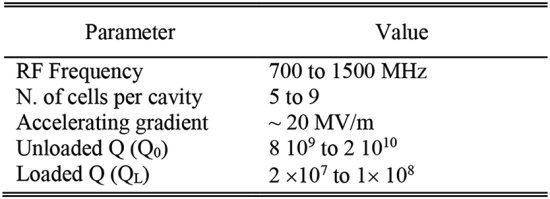
**SECCION VII.**

## **Linacs de Recuperación de Energía**

Un Energy Recovery Linac (ERL) es un linac recirculante en el que la energía invertida para acelerar el haz se recupera desacelerando el mismo haz a través del campo de RF de las cavidades de aceleración. La primera propuesta para esta máquina fue hecha por M. Tigner en 1965 [84] . La demostración del principio básico se logró en 1986 para el proyecto SCA / FEL en la Universidad de Stanford. Gracias a los desarrollos técnicos de las siguientes décadas, ahora hay un número creciente de ERL en diferentes etapas de operación y desarrollo [85] . Las posibles aplicaciones incluyen fuentes de luz, aplicaciones de enfriamiento de electrones y colisionadores de iones de electrones.

El almacenamiento eficiente de la energía recuperada del haz requiere que el resonante Q0 0 El factor de las cavidades linacas es muy alto, generalmente en el orden de 1010. Por lo tanto, aunque el proceso de recuperación puede implementarse tanto con linternas conductoras como superconductoras normales, es con cavidades superconductoras que la recuperación de energía es mucho más eficiente [86] . Las ventajas son aún más evidentes para CW o máquinas de corriente media alta. Por esta razón, la mayor parte del interés se concentra en los desafíos para los linacs ERL superconductores, CW o corriente media alta, como el diseño y la optimización de las cavidades, la amortiguación de HOM, la extracción eficiente de la potencia de HOM, la estabilidad de la Campos de RF y la optimización del sistema criogénico [87] , [88] y [89] . La Tabla III resume algunos de los principales parámetros relacionados con RF de ERL existentes o planificados.

**Tabla III** Parámetros típicos de RF

[[](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-table-3-source-large.gif)](https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/23/7454792/7323878/7323878-table-3-source-large.gif)

La elección de la frecuencia de RF depende de dos requisitos principales: la necesidad de extraer eficientemente la potencia HOM para mitigar las inestabilidades del haz y reducir la carga criogénica, y la necesidad de reducir las pérdidas dinámicas desde el modo de aceleración. El primero es esencial para las máquinas de clase de amperios de alta corriente. Este último se vuelve particularmente importante para las máquinas de clase GeV. Las frecuencias más bajas favorecen la limitación de la potencia HOM y la reducción de las pérdidas de BCS a una temperatura de funcionamiento dada. Las frecuencias más altas ayudan a reducir las pérdidas dinámicas del modo de aceleración de la cavidad y a minimizar el riesgo de comprometer el rendimiento de la cavidad debido a defectos en la superficie y la emisión del campo de electrones. Ejemplos de frecuencia adoptada para máquinas en operación o planeadas son: 704 MHz (eRHIC en BNL) [90] , 750 MHz (JLAB) [91], 700 MHz (LHeC en CERN) [92] , 1.3 GHz (Cornell, Berlin Pro) [93] y [94] .

Las formas de las cavidades están optimizadas para campos de baja superficie magnética, bajas pérdidas criogénicas, fuerte amortiguación HOM y factores de baja pérdida. Dado que los gradientes requeridos se logran con las tecnologías de vanguardia disponibles, el diseño de las cavidades para la operación de alta corriente se debe principalmente a la administración de energía del HOM y a las máquinas CW definidas por pérdidas criogénicas. Las vigas de corriente media alta y de longitud de racimo corto pueden excitar los HOM, lo que, además de afectar la estabilidad de la viga, podría aumentar la carga criogénica debido a la disipación de potencia en las paredes de la cavidad. Los modos dipolos también pueden causar inestabilidades de ruptura del haz (BBU) si no están suficientemente amortiguados. La extracción HOM generalmente se ve favorecida con la elección de un radio de iris más grande y menos células. Por lo tanto, las máquinas de la clase de amperios usan un número menor de células con iris más grande (por ejemplo, cavidad de cinco células para eRHIC), mientras que las máquinas de corriente más baja pueden emplear siete o incluso nueve células, con iris más pequeño, como las cavidades de tipo TESLA de 1.3 GHz. Además, el diseño de las cavidades debe incluir esquemas de amortiguación HOM de banda ancha, como amortiguadores de anillo en las tuberías de haz, acopladores HOM de guía de onda y diseño coaxial de tubería de haz. El gradiente operativo en la operación CW está limitado principalmente por la carga criogénica. Por lo tanto, mantener una Q alta en el rango operativo es importante para reducir la potencia disipada en el baño de helio y el costo de la superconductividad de RF de CW. La calidad del material (RRR niobio es el estándar), las técnicas de preparación de cavidades y el blindaje magnético son aspectos importantes a tener en cuenta. Además, el diseño de las cavidades debe incluir esquemas de amortiguación HOM de banda ancha, como amortiguadores de anillo en las tuberías de haz, acopladores HOM de guía de onda y diseño coaxial de tubería de haz. El gradiente operativo en la operación CW está limitado principalmente por la carga criogénica. Por lo tanto, mantener una Q alta en el rango operativo es importante para reducir la potencia disipada en el baño de helio y el costo de la superconductividad de RF de CW. La calidad del material (RRR niobio es el estándar), las técnicas de preparación de cavidades y el blindaje magnético son aspectos importantes a tener en cuenta. Además, el diseño de las cavidades debe incluir esquemas de amortiguación HOM de banda ancha, como amortiguadores de anillo en las tuberías de haz, acopladores HOM de guía de onda y diseño coaxial de tubería de haz. El gradiente operativo en la operación CW está limitado principalmente por la carga criogénica. Por lo tanto, mantener una Q alta en el rango operativo es importante para reducir la potencia disipada en el baño de helio y el costo de la superconductividad de RF de CW. La calidad del material (RRR niobio es el estándar), las técnicas de preparación de cavidades y el blindaje magnético son aspectos importantes a tener en cuenta. Mantener un alto Q en el rango operativo es importante para reducir la potencia disipada en el baño de helio y el costo de la superconductividad de RF de CW. La calidad del material (RRR niobio es el estándar), las técnicas de preparación de cavidades y el blindaje magnético son aspectos importantes a tener en cuenta. Mantener un alto Q en el rango operativo es importante para reducir la potencia disipada en el baño de helio y el costo de la superconductividad de RF de CW. La calidad del material (RRR niobio es el estándar), las técnicas de preparación de cavidades y el blindaje magnético son aspectos importantes a tener en cuenta.

Debido a la alta QLDe las cavidades, el control y la minimización de las vibraciones microfónicas son muy importantes para el funcionamiento de ERL. La microfonía puede causar grandes desviaciones de fase y amplitud que deben corregirse para evitar afectar la propagación de energía al final de la linaca. La minimización de la microfonía requiere optimizar el diseño mecánico de las cavidades, del hardware circundante y del criomódulo. Se puede lograr una reducción adicional con esquemas de control activo o pasivo, como sintonizadores de frecuencia rápida.

La operación de ERL exige una alta estabilidad de los campos de RF. Por ejemplo, los requisitos de la fuente de luz ERL son del orden de10- 4en amplitud e inferior a 0.05 ° en fase. Esto exige sistemas LLRF avanzados de última generación basados ​​en controladores digitales con latencia mínima en los bucles de control. Desde lo altoQL de las cavidades hace que sea muy difícil realizar controles de suma vectorial de múltiples cavidades alimentadas por la misma fuente, una cavidad / una fuente de alimentación es el esquema de alimentación óptimo.

La operación CW implica una carga dinámica significativa de las cavidades en un ERL. La optimización del sistema desde el punto de vista de la criogenia es, por lo tanto, obligatoria para reducir los costos de capital, operación y mantenimiento, y para maximizar la capacidad y confiabilidad del sistema.

Los ERL están actualmente en operación en JLAB, JAERI y BINP (conducción normal). La I + D en SRF para ERL es muy activa y se están desarrollando varios desarrollos en diferentes laboratorios, abordando los aspectos clave para futuros ERL de alta corriente y alta potencia. Se están desarrollando nuevos proyectos y estudios en BNL (eRHIC) [90] , CERN (LHeC) [92] , y en la Universidad de Cornell, HZB (BerlinPro), KEK (cERL), IHEP, Daresbury y otros laboratorios de todo el mundo.

**SECCION VIII.**

## **Progreso en la tecnología de cavidad**

Aquí, revisaremos el progreso y los avances tecnológicos de las cavidades de aceleración (estructuras) utilizadas para varios tipos de aceleradores.

Un componente clave de los aceleradores de partículas modernos son las cavidades de RF, y dado que hay muchos tipos diferentes de aceleradores y aplicaciones, las cavidades de RF se usan para diferentes propósitos y diferentes capacidades. El uso más común es impartir energía a las partículas cargadas y esta característica las convierte en uno de los componentes principales de cada acelerador. También hay otros tipos de cavidades no aceleradoras que se utilizan para la desviación de RF, agrupamiento de RF y diagnóstico de haz, como los monitores de posición del haz de cavidad. Sin embargo, durante las últimas cinco décadas ha habido principalmente dos innovaciones importantes en la tecnología de cavidades: la superconductividad y los códigos de computadora para el diseño de cavidades. Estas dos nuevas innovaciones, junto con una mejora de las técnicas de construcción, han cumplido requisitos exigentes en términos de:

* mayor impedancia de derivación para el modo de aceleración u operación, reduciendo así las pérdidas de potencia de la pared de RF;
* mayor frecuencia de los sistemas de RF, en particular para aceleradores lineales;
* tasa de descomposición más baja en gradientes de aceleración más altos;
* aumentar la potencia de RF en operaciones de onda pulsada y continua;
* mejorar la distribución de corriente de superficie para una mayor eficiencia del diseño del sistema de enfriamiento;
* supresión de los efectos multipactor;
* amortiguación de los modos parásitos;
* Wakefield y estudios de impedancia.

Recently, more powerful computers have greatly facilitated the 3D modeling of complex shapes with large numbers of mesh and have helped to solve with extreme accuracy the most complex RF and microwave problems. Basically, the design of the cavities is performed in two steps—the first one with 2D codes that are faster and allow designing the geometries of the cavities with rotationally cylindrical symmetry. The next step is to use 3D codes to complete the design by modeling the cavity equipped with power input/output couplers and loop, antenna, or waveguide dampers for parasitic higher order modes. Furthermore, mechanical cavity designs can be performed through multi-physics simulations where the development of cavities, in particular with superconducting technology, requires a complex and self-consistent electro-thermal-mechanical-electro analysis.

In the last two decades, the improvements of the construction techniques have permitted the manufacturing of RF cavities with much tighter tolerances and with a greatly improved surface finishing for high-gradient applications. Two interesting lectures on the cavity construction techniques are in references [95] and [96]. Another strong motivation to improve the cavity technology is that the fabrication of RF cavities, in particular the traveling-wave accelerating structures, has to meet the stringent requirements to minimize cost and to achieve a stable process for an economical industrial series production over the years. An example of state-of-the-art construction of an accelerating structure in a linear accelerator is the new 2-m long C-band accelerating structure developed at PSI for the SwissFEL project [97]. In that case the mass production foresees the construction of 104 cavities. This kind of structures does not foresee any tuning steps from the cups production to the installation into the bunker. Target precision of a single copper cup is less than ±2 μm with surface finishing Ra of 25 nm and concentricity of less than 50 μm before and after brazing of a stack of 111 copper regular cells and two couplers for a total length of approximately 2 m. Fig. 18 shows the SwissFEL C-band structure after brazing. Bead pulling measurements have confirmed the high precision machining of the cups and couplers and the choice to produce the structures without implementing mechanical tuning on the cups, i.e., any push-pull technique. Furthermore, the measurement of the Q-factor was within 1% of the simulated one and the rms phase advance error was less than 2° on the whole structure which has a negligible effect on the energy gain.

**Fig. 18.**

Two-m-long brazed swissfel C-band structure.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

The manufacturing process of the individual cup foresees an initial raw-cut and pre-turned on a conventional and numerical lathe to a precision of about 10 μm while the finish of the cups is performed on a sturdy and pneumatically stabilized slanted bed lathe using poly and mono-crystalline diamond (PCD, MCD) tools in a temperature and humidity controlled machining compartment of the lathe itself. Metrology measurements on the copper cells have shown a precision of the turning better than ±0.5 μm. The copper is oxygen free, high-conductivity and forged in three-dimensions to have a homogeneous distribution of the small pores, a stress-free and intrinsically stable material. In order to assure the required concentricity, a robot with an action radius of 2 m and tridimensional accuracy of 5 μm is used for the stacking of the cups before brazing. Fig. 19 shows the KUKA robot type KR 30 HR used for the stacking. More details on the manufacturing process for the SwissFEL C-band accelerating structure can be found in reference [98].

**Fig. 19.**

KUKA robot type KR 30 HR used for the stacking of the regular cells of the C-band accelerating structures for the swissfel project.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

In the following sections we will mainly focus on cavities for RF linacs.

### A. Cavities for Room Temperature Linacs

RF linacs can be categorized as low frequency, microwave frequency, pulsed or contiguous wave (CW), traveling wave (TW), standing wave (SW), room temperature, or superconducting. The structures are made of an array of conducting gaps or cavities to generate and support RF waves with an electric field parallel to the beam through some resonance process. RF linacs have been used for a wide range of applications from high-energy colliders [99], injectors into circular accelerators [100], free electron lasers [101], energy recovery linacs [102], and medical and industrial accelerators [103]. One can further classify the linacs accelerating cavities based on changing velocity, which include low-β Fixed-Field Alternating Gradient Accelerators (FFAGs) and low-β proton and ion linacs. Electron linacs and high-β FFAGs fall under the category of constant velocity and fixed RF frequency accelerators. Generally speaking, cavities fall into two classes: TE-mode (H-mode) and TEM-mode cavities. The H-mode cavities have smaller magnetic fields on the inner cavity surface, which would result in lower losses due to higher shunt impedance at low energies. Although TE/TM mode cavities are ideal for frequencies in the 100's MHz range, for lower frequencies, the cavities’ dimensions become large and unrealistic for fabrication and operation. For heavy ions, due to their low velocity, the linacs are often designed to operate in low frequencies (for example, less than 100 MHz), thus forbidding the usage of TE/TM type cavities. For β≪1 (ions), the Sloan and Lawrence structure [104] designed to operate from 10 to 100 MHz followed by “H-type” structure where the field of the transverse electric mode is made accelerating through the drift tube configuration. For the “Quasi” Alvarez structure (0.03<β<0.4) [105] the rate of accelerating is lower than the H-type structure. The Alvarez structure (0.03<β<0.4), most commonly used for protons, allows very large intensities and frequency between 100 and 400 MHz [106]. With β approaching 0.5, the RF losses increase, and the drift tubes become resonant-like λ/2 antenna. For β>0.4, proton machines, and side-coupled cavities have been used for compactness for frequencies from 600 to 1200 MHz [107] and [108].

Starting with normal conducting accelerating structures for protons, we will review: 1) Drift Tube Linac (DTL), 2) The Coupled Cavity Drift Tube Linac (CCDTL), 3) The Side-Coupled Linac (SCL), 4) The Crossbar H-type DTL (CH-DTL), 5) The PI-Mode Structure (PIMS), and; 6)Radio Frequency Quadrupole (RFQ).

1. DTL - As briefly alluded to above, the classical drift tube linac is generally used for lower energy sections of proton linacs as its RF efficiency significantly decreases at above 100 MeV. Several DTLs have been in operation for several decades worldwide including the ISIS linac at RAL [109], and Linac4 at CERN [110]. More recently, new DTL designs for high intensity linacs have been commissioned at J-PARC in Japan [111] as well as the Spallation Neutron Source (SNS) at Oakridge National Laboratory in the United States. [112]. The DTL for the CERN Linac4 [113] (see Fig. 20) will accelerate H− ion beams of up to 40 mA (average) from 3 to 50 MeV using three accelerating tanks which are designed to operate at 352.2 MHz and up to 10% duty factor. The accelerating field is ∼3.2 MV/m over the length of the DTL section.
2. CH-DTL–The Crossbar H-mode DTL is a multi-cell drift tube cavity developed at the Institute of Applied Physics (IAP) in Frankfurt, Germany [114]. This type of structure, shown in Fig. 21, is well suited for high intensity proton and ion pulsed linacs from 5 to 150 MeV. The CH-DTL is considered as a potential alternative to the classical E-mode cavities.
3. CCDTL–The Cell-Coupled Drift Tube Linac structure (see Fig. 22) is considered as an alternative to the conventional drift tube linac above 40 MeV or so with comparable energy efficiency, and is simpler to fabricate and align [115] and [116]. Almost all the designs are based on short versions of DTL-like structures. One of the key advantages of CCDTL over more complex drift tube linacs with impeded quadrupole assembly is the cost. Its design lends itself to less stringent alignment tolerances. One disadvantage could be the placing of the quadrupoles outside the accelerating tank, which would increase the focusing period length and the maximum acceptable phase advance per period sets at a lower energy limit where these structures can be used.
4. SCL–Maintaining a reasonable efficiency at higher energies with DTL or CCDTL structures due to shunt impedance drop and higher power losses led to the design of side-coupled linac structures at Los Alamos Meson Physics Facility (LAMPF) [117]. Side-coupled cavities take advantage of the fact that the even numbered cavities are the only cavities excited in the π/2 mode without the problems of mistuned cavities. The LANL side-coupled cavity design places the odd numbered cavities, which are not excited, away from the beam line, which in turn allows the on-line cavities to be designed for maximum efficiency. See Fig. 23.
5. PIMS - Pi-mode structures (PIMS) have typically been chosen for high-energy synchrotrons and for medium- to higher-beta accelerating superconducting structures. These structures had been successfully used for electron synchrotrons at PEP [118] and LEP [119]. At CERN, the PIMS replaces the Side-Coupled Linac (SCL) of the Linac4 high-energy section [120]. The mechanical design of these structures is very similar to that of the 352-MHz normal-conducting 5-cell LEP accelerating cavities. Linac4 high-energy section (102 to 160 MeV) will use 84 cells (12 cavities of 7-cell structures). Fig. 24 shows a Pi-Mode structure being tested.
6. RFQ–In 1970 Kapchinskij and Teplyakov (KT) proposed the idea of the Radio Frequency Quadrupole (RFQ) [121]. The first experimental test of KT's idea was produced in 1974 at the USSR Institute for High Energy Physics in Protvino using a 148.5 MHz RFQ to accelerate protons form 100 KeV to 620 keV with an efficiency of about 50%. In 1980, a 425 MHz RFQ at Los Alamos National Laboratory accelerated a 100-keV proton beam to 640 keV with an efficiency of about 90%. Currently hundreds of RFQ structures are in operation worldwide. Fig. 25 shows a 57 MHz CW RFQ which was developed and tested at ANL that reached 92 kV without voltage breakdown and only limited by the RF power [122].
7. On-Axis-Coupled (OCS)–The OCS linacs with magnetic coupling (through the slots between cells) is an alternative to the Side-Coupled Structures (SCS). The main parameters to be optimized for high current application and consequent heavy continuous beam loading are the field tilt and the system stability. This favors high inter-cavity coupling and bi-periodicity. An 804 MHz version of OCS was designed, built, and tested at Chalk River Nuclear Laboratories with average gradients of 1.8 MeV/m [123]. Magnetic slots can provide sufficient coupling for the very heavy beam loading and the mechanical simplicity of the on-axis coupled structure. An OCS with magnetic coupling was also used for the LANL Advanced Free-Electron Laser Initiative with high gradients (up to 22 MeV/m), high peak-power klystron (20 MW), and up to 50-ms long macro pulses. For CW operation with heavy beam loading this structure has been used in the Mainz [124] and INP MSU [125] racetrack microtrons.

In comparison to proton linacs, where the accelerating structures need to follow the changing velocity, the electrons in electron linacs are almost immediately relativistic (β=0.95, E∼1 MeV), which means that identical accelerating structures designed and optimized for β=1 can be used after the electron source through the rest of the linac. If the particle velocity is close to the speed of light (β∼1) the drift tube length required to achieve synchronism becomes very long for practical applications, thus for relativist particles, different classes of traveling-wave structures are used from few hundreds of MHz to several GHz.

**Fig. 20.**

CERN linac-4 DTL prototype.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

**Fig. 21.**

Single module CH-dtl.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

**Fig. 22.**

CCDTL scheme.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

**Fig. 23.**

LAMPF scl structure.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

**Fig. 24.**

Pi-mode accelerating structure.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

**Fig. 25.**

General view of ANL 57 mhz CW rfq.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

The largest electron linacs are the SLAC 2-mile (3.2 km) linear accelerator, which accelerates either electrons or positrons up to 50.0 GeV [126]. The linac was designed around disk-loaded constant gradient (CG) traveling-wave structures of roughly 3-meter long each. Both the electric field strength and power dissipation in a CG structure are constant over its length.

One can also use a constant-impedance (CI) structure, which has identical unit cell structure. Constant gradient structures have several advantages over a CI structure, such as detuning of higher-order-modes [127]. Traveling-wave structures are extremely efficient for short pulses (∼ μsec) and can reach high efficiency and high accelerating gradients [128].

The quest for higher accelerating gradients triggered the X-band RF technology program at SLAC in 1987 to provide a path towards a higher gradient future linear collider. In the early 1990's, KEK joined the high-gradient X-band development program and the first generation technology built the next linear collider (NLC) Test Accelerator [129]. The first generation technology was based on 50 MW klystrons, SLED-II pulse compression and 1.8-meter accelerating structures (see Figs. 26 and 27). The structure's performance was limited by RF breakdown to about 40 MV/m. A decade later, in 2004, the second generation of RF systems was comprised of dual-mode SLED-II pulse compression and shorter structures, 60-90 cm using solid-state modulators [130], [131], and [132]. This system operated more than 2000 hours at greater than 65 MV/m with 300 MeV acceleration. Extensive R&D on breakdown limitations in microwave structures between 2004 and 2010 with the U.S. High Gradient Collaboration, CERN, and Japan made it possible for X-band gradients to go from ∼50 MV/m (loaded) to ∼150 MV/m with ∼100 MV/m expected routinely [133]. This was possible with better understanding of breakdown and limits through a combination of analytical modeling, numerical simulation and experiments. Unfortunately, the NLC program ended without large-scale demonstration.

**Fig. 26.**

SLAC sled-II pulse compression.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

**Fig. 27.**

SLAC nlc 1.8 m accelerating structure.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

Another major large-scale room-temperature accelerator is the 3 TeV Compact Linear Collier (CLIC) at CERN. To reach 3 TeV in a reasonable length, high accelerating gradients (100 MV/m or more) are essential, which requires high peak power with good efficiency to provide power to the accelerating structures. Over the past 25 years, CLIC has conducted an impressive R&D for acceleration structures in collaboration with SLAC in the United States and KEK in Japan from the original CLIC 30-GHz structures. Optimization of the CLIC 30 GHz structure resulted in a damped and detuned accelerating structure, hybrid damped structure (HDS) [134] shown in Fig. 28. This structure confined the fundamental mode inside the cavity (below the waveguide cut-off frequency), while allowing all other modes to propagate in the waveguide, which then absorbed into matched loads. In 2008, 12-GHz (X-band) structures were chosen on extensive RF performance, beam dynamic, and cost optimization (see Fig. 29) [135].

**Fig. 28.**

CERN clic 30-GHz structure.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

**Fig. 29.**

CERN clic X-band RF structure.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

In 1996, KEK launched an R&D program on a C-band RF system for a 500-GeV c.m. energy electron-positron collider [136]. The main goals were to provide higher gradient beam acceleration, highly stable beam, and a reliable and cost effective machine. Based on these goals, C-band 5712 MHz was chosen as the optimum frequency with the advantage of obtaining higher accelerating gradient. The cavity was based on a simple HOM-free accelerating structure proposed by T. Shintake [137] in 1992, which combined a choke mode cavity with RF absorbers depicted in Fig. 30.

**Fig. 30.**

KEK c-band RF cavity.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

### B. Cavities for Superconducting Linacs

The early history of the application of RF superconductivity to particle acceleration can be traced to an ambitious effort to build a large superconducting linear accelerator at Stanford in the mid-1960's [138]. The accelerating structure for this application was a multi-cell niobium cavity operating at 1300 MHz. Although this project had numerous successes, it faced several key technical problems, including limitations of the accelerating field of the niobium accelerating structures, and limitation on maximum beam current, which was limited by beam-breakup caused by beam-excited transverse modes in the cavities [139]. Although the relatively low accelerating field was limited to ∼3 MV/m, not suited for the intended large linear accelerator, it was used for several years at the University of Illinois electron microtron [140].

In the late 1960's, the Nuclear Research Center in Karlsruhe initiated a program for ions acceleration using RF superconductivity. These early cavities were single niobium half-wave (λ/2) helix resonators [141]. Mechanical flexibility of the helix caused RF frequency variations that made it extremely difficult to control the structure RF phase. This problem was later solved using six λ/2 resonators at 1 MV/m field gradient [142].

Following this development, the California Institute of Technology (Caltech) started work on similar helix resonators using superconducting lead plated on copper [143] in the early 1970's. This approach had the advantage of changing the cavity geometry with relative ease. The Caltech effort led to the development of two new accelerating structures: the spiral and the split-ring [144]. These were seen as important developments as they allowed decoupling of the functions of the RF resonant circuit and accelerating field allowing for an increase of the effective accelerating field for a given maximum surface electric field with the added important advantage of better mechanical stability.

In the mid-1970's, a group at Argonne National Laboratory started a project looking into superconducting RF structure technology as a way of increasing the energy of heavy ions from a tandem Van de Graaff. Argonne's initial development was also focused on helical resonant cavities, but as mentioned before, the difficulties of phase stabilization of a mechanically unstable resonator soon became apparent. With this realization, the project focused on a three-gap split-ring structure (invented in mid-1970's) that culminated in the first acceleration of heavy ion for nuclear physics research using superconducting RF technology in 1978 [145]. This facility, which later became known as the Argonne Tandem Linac Accelerating System (ATLAS), has been providing heavy ions beams to the nuclear physics research program at Argonne. RF resonators used at ATLAS are shown in Fig. 31. [146]. Ben-Zvi and Brennan also studied quarter wave resonator for use in a superconducting heavy ion linac [147].

**Fig. 31.**

Three types of niobium resonator in ATLAS. Left: β=0.105, middle: β=0.16, and right: β=0.06 operated at 97, 145.5, and 97 mhz, respectively.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

Since the pioneering work of the early years, superconducting RF technology has been rapidly evolving to meet the challenging performance requirements of existing and future superconducting RF accelerators from niobium and other materials beyond the standard bulk niobium [148] and [149]. These developments resulted in new types of superconducting structures for proton, ion, and electron linac accelerators, including low- and medium cavities, Quarter-Wave Resonator (QWR), Half-Wave Resonator (HWR), Spoke cavities, and high-beta elliptical cavities.

The largest currently operating SRF facility is the CEBAF 6-GeV recirculating electron linac at Jefferson Lab [122], with over 350 operational multi-cell cavities at 1496 MHz (see Fig. 32). This facility has recently completed its energy upgrade to 12 GeV by adding ten new high-performance cryomodules [150], [151], and [152].

**Fig. 32.**

CEBAF 1496 mhz superconducting RF cavities cryomodule.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

The ISAC-II accelerator at TRIUMF [153] has 40 quarter-wave resonators (QWR) of three varieties (see Fig. 33). The linac QWR's operate in CW mode with a peak surface field of ∼35 MV/m and an accelerating field of ∼7 MV/m with a cavity power of ≤7 W.

**Fig. 33.**

ISAC-ii QWRs. From left to right: 106 mhz (7% beta cavity), 106 mhz (5.7% beta cavity) and 141 mhz (12% beta cavity).

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

The SPIRAL-2 accelerator at GANIL in France [154] has 26 88-MHz QWR cavities: fourteen β=0.12 and twelve β=0.07 cavities. These cavities operate in CW at a nominal gradient of 6.5 MV/m and less than 10 W dissipated power per cavity at 4.2 K. Fig. 34 shows SPIRAL-2 cavities.

**Fig. 34.**

GANIL spiral-2 cavities.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

For a higher performance cryomodule, the ATLAS upgrade at Argonne developed new innovative cavity fabrication and surface treatment for cryomodules comprised of seven 72.75 MHz QWRs (β=0.077), achieving peak electric field over 80 MV/m as shown in Fig. 35.

**Fig. 35.**

ATLAS upgrade cryomodule with seven QWRs.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

The completion of the Spallation Neutron Source (SNS) [155] at Oakridge National Laboratory in April 2006 with the first delivery of proton beam pulses on the mercury target was made possible using superconducting RF technology with significant advantages offered, including large apertures, operational flexibility, and high gradient, with less real estate and lower operation costs. The SNS SRF elliptical cavities are configured based on medium beta and high beta sections. The medium beta section consists of eleven cryomodules with three multi-cell cavities per cryomodule, while the high beta section has twelve cryomodules with four cavities per cryomodule. The effective accelerating gradients are 10.1 MV/m (E0T) at β=0.61 and 15.9 MV/m at β=0.81 [156]. The cavities are shown in Fig. 36.

**Fig. 36.**

SNS medium- (top) and high-beta (bottom) cavities.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

The Facility for Rare Isotope Beams (FRIB) currently under construction at Michigan State University is a continuous-wave superconducting heavy ion linac to accelerate all the stable isotopes to above 200 MeV/u with a beam power of up to 400 kW [157]. The FRIB driver linac has a total of 340 low-β cavities in three segments: segment 1 with QWRs of β=0.041 and β=0.085, and segments 2 and 3 with HWRs of β=0.29 and β=0.53. All FRIB cavities work with superfluid helium at 2 K. A design of the FRIB cryomodule is shown in Fig. 37.

**Fig. 37.**

FRIB cryomodule design for eight QWRs with three solenoids.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

The ALPI (Acceleratore Lineare Per Ioni) superconducting linac at INFN-Legnaro operates with 64 QWRs with forty-four 160 MHz Nb/Cu cavities (at β=0.11), eight 160 MHz Nb/Cu cavities (at β=0.13), and twelve 80 MHz niobium cavities (at β=0.055). Upgrade of the low-beta Nb cavities made it possible to operate at about 5 MV/m from previous 3 MV/m [158] and [159]. The ALPI SC structure is shown in Fig. 38.

**Fig. 38.**

ALPI sc structures. (left) 80 mhz and (right) 160 mhz.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

LHC at CERN utilizes eight single-cell elliptical 400-MHz superconducting cavities per beam for a total of sixteen cavities in four cryomodules (see Fig. 14) [160]. The 3 mm thick copper cavities are sputtered with 1−2 μm niobium film. Cavities operate at a 5.5 MV/m nominal gradient. Cavities are powered with high-power variable power couplers with an external quality factor (Qext) ranging from 11,000 to 200,000 and equipped with four higher-order-mode dampers per cavity: two narrow-band and two wide-band. Each cavity is powered by a dedicated klystron rated at 330 kW.

The High Intensity and Energy Isotope Separator On Line Device (HIE-ISOLDE) project at CERN is a major upgrade of the ISOLDE facility [161] and [162], which is intended to increase the energy, intensity, and quality of the beams delivered to ISOLDE users. The superconducting QWR structure's fabrication is based on the technology of niobium sputtering on copper taking advantage of both superconducting characteristics of niobium as well as the stiffness, high thermal conductivity, and low cost of thick copper substrate. A total of 32 superconducting cavities are needed: twenty high-beta and twelve low-beta. These cavities will operate at 4.5 K with an accelerating field of ∼6 MV/m and 10 W RF losses. A 5-cavity cryomodule is shown in Fig. 39.

**Fig. 39.**

HIE-isolde 5-cavity cryomodule.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

### C. Damping or Detuning of Higher-Order Modes (HOM)

As discussed in Section V, in high current lepton rings the higher order modes (HOM) of the accelerating cavities can drive coupled bunch instabilities in the longitudinal or transverse plane when the current exceeds the threshold currents given in Equations [(12)](https://ieeexplore.ieee.org/document/#deqn12) and [(13)](https://ieeexplore.ieee.org/document/#deqn13), respectively. We will provide a brief review of methods to overcome HOM driven instabilities.

#### 1. 1) hom Damping

The most obvious way to raise the instability thresholds consists of damping the HOMs by means of HOM antennas with notch filters on the fundamental frequency to minimize the power extracted from the accelerating mode.

HOM couplers were, for instance, developed for the existing normal conducting five-cell PETRA cavity to reduce the HOM impedances by a factor up to 5, thereby increasing the instability threshold on DORIS from 100 to 500 mA [163]. For superconducting cavities, pertaining to the high unloaded quality factors of the HOMs in the range of 109, it is mandatory to provide HOM damping, even for an implementation on comparably low current machines like the HERA electron ring [164] or for the LEP II upgrade [165]. Fortunately, thanks to the rather open bell shapes, the HOMs of multi-cell superconducting cavities propagate well along the structure and loaded Q factors on the order of a few 1000 can typically be obtained with three HOM couplers that couple to all dangerous longitudinal HOMs as well as to the transverse HOMs in their two orthogonal polarizations. In order to not impair the operation with high field gradients for the fundamental mode, the HOM dampers cannot be connected directly on the accelerating cells but are mounted on the beam tubes at the extremities of the cavities.

#### 2. 2) strongly HOM Damped Normal Conducting Single Cell Cavities

For high intensity lepton machines such as light sources or B factories, the addition of HOM dampers to existing cavities may not suffice to reach the nominal current. Moreover, effective coupling to all HOMs of multi-cell copper cavities is not possible, as some HOMs may be trapped in cells without an attached HOM coupler. For such machines, strongly HOM damped single cell cavities have been developed.

The ideal HOM damper couples effectively to all HOMs and not at all to the fundamental mode and should therefore have a high pass filter characteristic. This can be achieved by means of waveguides that are directly flanged to the cavity and terminated with ferrite absorbers, as for the 368.25 MHz cavities of the DAΦNE Φ-Factory [166] and those of the PEP II B-Factory [167]. The waveguide cut-off frequency is below the lowest HOM frequency, so that all the HOMs propagate to the ferrite absorbers where they are effectively damped, but it must remain sufficiently above the RF frequency and the waveguides must be long enough so that the fundamental accelerating cavity mode is not loaded by the ferrite absorbers. Following these considerations, the rectangular waveguides connected to the PEP II or the DAΦNE cavity have rather large transverse dimensions, which constitute a significant perturbation of the fundamental mode and limit its achievable shunt impedance. For the PEP II cavity, the HOM waveguides are folded in order to limit the longitudinal extension of the structure.

The concept was improved for the normal conducting strongly HOM damped 500 MHz cavity that was developed at BESSY and implemented on the ALBA storage ring [168]. Circular ridge waveguides with considerably smaller cross-sections for comparable cut-off frequencies were implemented for the HOM dampers and terminated with well-adapted water-cooled ferrite loaded tapers. The HOM dampers are attached on a cylindrical cavity with nose cones and are perpendicular to the beam axis, thereby substantially reducing the length from 1.5 m for the PEP II cavity to 0.5 m for the BESSY cavity. As another consequence, the fabrication invokes standard machining, brazing and electron welding instead of the costly electroforming for the PEP II cavity. The BESSY cavity has a similar R/Q of 117 Ω but a lower Q factor of 26700 as compared to the PEP II cavity with its Q of 32400. As a consequence of a residual gap left by construction between the waveguide ridges and the cavity ports, an unforeseen heating of the corresponding vacuum flange and a not well understood, badly damped TM110 HOM showed up on the BESSY/ALBA cavity. The problems could be solved for the operation at ALBA, and as a side effect, an improved Q of 29600 was obtained [168] and [169].

Para la actualización de ESRF, las cavidades de cinco celdas tipo LEP existentes serán reemplazadas por cavidades HOM amortiguadas de 352.2 MHz como se muestra en la Fig. 40 . Se basa en el concepto BESSY, pero en lugar de escalarlo en frecuencia, los amortiguadores de cavidad y HOM fueron completamente optimizados y rediseñados [170] .

**Figura 40.**

Una sola célula fuertemente HOM amortiguó la cavidad ESRF; (arriba) prototipo de SDMS en el laboratorio de RF; (abajo) prototipo de CINEL en el ensamblaje final previo de fábrica.

[Ver todo](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

Como se puede ver en la Fig. 40 (abajo), los espacios entre las crestas de la guía de ondas y los puertos de la cavidad podrían suprimirse. La geometría de la cavidad, y en particular la forma de los conos de la nariz, se volvieron a optimizar para obtener un R / Q tan alto como145 Ω y una Q de 33500 sin comprometer la amortiguación HOM. Las impedancias residuales de HOM se redujeron al mínimo optimizando las secciones transversales de los amortiguadores de HOM y sus ubicaciones precisas en la cavidad. Los amortiguadores HOM podrían hacerse mucho más cortos que en la cavidad BESSY / ALBA, aunque la frecuencia fundamental es menor. El tercer amortiguador HOM en la parte superior solo es necesario para modos superiores a 1 GHz y puede ser lo suficientemente corto como para caber en el túnel del anillo de almacenamiento existente. Después de una prueba exitosa de los prototipos, RI-Research Instruments está fabricando doce cavidades adicionales para el nuevo anillo de emisión ultra baja que se instalará y pondrá en servicio en el ESRF en 2019.

Tenga en cuenta que la solución ESRF para suprimir los espacios entre las crestas de la guía de onda y los puertos de la cavidad se ha adaptado a la versión más reciente de la cavidad BESSY construida para el anillo BESSY II.

#### 3. 3) Cavidades superconductoras amortiguadas fuertemente HOM

Para cavidades conductoras normales, una amortiguación HOM eficiente degrada necesariamente el rendimiento del modo de aceleración fundamental en comparación con una cavidad perfecta que no tiene puertos grandes para amortiguadores HOM. Esto se puede superar con cavidades superconductoras (SC), para las cuales una pequeña R / Q geométrica se compensa con grandes factores Q sin carga en el109 9rango [171] y [172] . Gracias a su geometría inherentemente abierta, las cavidades superconductoras se pueden optimizar fácilmente para propagar los HOM a los amortiguadores HOM adyacentes. Las primeras dos cavidades superconductoras fuertemente amortiguadas HOM se desarrollaron en Cornell para la máquina CESR de alta corriente, como se muestra en la Fig. 41 , y en KEK para la fábrica KEK B. En ambas cavidades, los HOM están amortiguados por absorbedores de ferrita enfriados por agua en los tubos de haz grandes fuera de los criostatos de la cavidad. A pesar de la baja R / Q, el voltaje de RF solo está limitado por el campo de pico de superficie máximo alcanzable y, dependiendo de la corriente del haz, por la potencia de haz máxima que puede transferirse a través del acoplador de potencia de RF.

**Figura 41.**

HOM amortiguó fuertemente la cavidad CESR superconductora [172] .

[Ver todo](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

Note that the low R/Q's of the fundamental and higher order modes of SC cavities also help with minimizing adverse 0transient beam loading effects and the broad band impedance that may limit high single bunch currents [171] and [172]. These aspects were relevant for the decision to implement SC cavities on LHC.

Another approach was adopted for the strongly HOM damped 352.2 MHz SC SOLEIL cavity, where the ferrite absorbers were replaced with conventional HOM antennas connected by coaxial feedthroughs to coaxial power loads outside the cavity cryostat [173] and [174]. This avoids any possible contamination of the internal cavity surfaces due to the proximity of HOM power loaded ferrite material that could outgas and lead to de-conditioning of the cavities or the power couplers. The SOLEIL cryostat contains a pair of SC cells that are connected by a large beam pipe in which all the HOMs have substantial fields. Only the fundamental accelerating mode of each cell is trapped and has negligible fields in the connecting pipe. The HOM damping is very efficient and the cavities in operation at SOLEIL have proven to be very reliable.

#### 4. 4) hom Detuning

According to Section VI, coupled bunch instabilities can occur when a synchrotron or a betatron sideband enters in resonance with a narrowband longitudinal or transverse HOM. With the sidebands of adjacent coupled bunch modes of orders n and n+1 being separated by one revolution frequency f0, there is plenty of room in-between where a HOM resonance fHOM can be “parked” in order to not drive a coupled bunch instability. The smaller the ring, the larger f0 is, and the larger the frequency band for fHOM is as well, where the HOM remains harmless. This was systematically applied when the Elettra light source was designed. As each cavity mode detunes differently as a function of the cavity temperature, the single cell Elettra cavity and its cooling system were designed such as to allow tuning all dangerous HOMs off beam sidebands while keeping the accelerating mode on resonance [175]. Later on an adjustable mechanical HOM shifter was added to keep the HOMs off resonance for a wider range of beam currents and energies of the energy ramped Elettra storage ring [176]. Elettra cavities and the HOM detuning technique have been implemented on several other machines such as SLS or ANKA.

The existing ESRF storage ring is equipped with five units of a two-coupler version of the five-cell LEP cavity, which provide the required accelerating voltage of 9 MV and transfer up to 1.1 MW of RF power to the beam at 200 mA, as shown in Fig. 17 (top plot). However, the lowest thresholds for HOM driven longitudinal coupled bunch instabilities are around 60 mA. Although the numerous HOMs of this multi-cell cavity do not allow a systematic tuning as for the single cell Elettra cavity, thanks to a temperature regulation system with a precision of ±0.05∘C, an empirical HOM tuning allowed detuning of all the dangerous HOMs and obtaining stable operation for currents exceeding 200 mA.

#### 5. 5) landau Damping By Fractional Filling of the Ring

In the early days, before the elaborate cavity temperature tuning was operational, the ESRF was mostly operated with a fractional filling of the storage ring as the beam was found to remain stable up to much higher currents than with a uniform filling. The transient beam loading of the RF cavities by a gap in the filling pattern modulates the RF voltage and results in a spread of the synchrotron frequencies from bunch to bunch along the bunch train. This provides additional Landau damping to longitudinal coupled bunch oscillations with a corresponding substantial increase of the instability thresholds [177].

#### 6. 6) landau Damping With Harmonic Cavities in Bunch Lengthening Mode

Landau damping can also be generated with a spread of the synchrotron frequencies for different particles inside the same bunch by distorting the RF potential around the synchronous phase. This can be achieved by means of harmonic RF cavities operated in bunch lengthening mode, which are therefore also called Landau cavities. For the small 1.5 GeV light source MAX II, very effective Landau damping of HOM driven instabilities far above threshold was obtained with a third harmonic normal conducting RF cavity [178]. A numerical study compared to experiments at various places indicates that Landau cavities would be less effective for higher energy machines like, for example, the 6 GeV storage ring of the ESRF [179].

Superconducting harmonic cavities implemented primarily for bunch lengthening in order to increase the Touschek lifetime have also been used successfully to suppress HOM driven longitudinal coupled bunch instabilities at high currents at SLS [180] and Elettra [181]. Both machines operate a pair of third harmonic 1.5 GHz SC cavities with a design derived from the 352.2 MHz accelerating cavities of SOLEIL. Note that a lifetime improvement by a factor of 2 to 3 has been obtained at SLS and Elettra by lengthening the bunches. The proposed Advanced Photon Source (APS) multi-bend achromat (MBA) lattice at Argonne National Laboratory includes a passive 1.4 GHz superconducting cavity for bunch lengthening to alleviate lifetime and emittance concerns. A superconducting passive 1.057 GHz 3rd harmonic cavity is also under study to increase the lifetime for the future low emittance ring at the ESRF.

#### 7. 7) bunch-By-Bunch Feedback

The demand for a high level of brightness in synchrotron light sources and higher luminosity in circular colliders requires storage of multi-bunches with high intensity particle beams. The interaction of beam with the surrounding enclosure will rise to collective effects known as “coupled-bunch instabilities” where charged particles in a storage ring will be subject to both transvers (betatron) and longitudinal (synchrotron) oscillations that are normally damped by a natural damping mechanism. The electromagnet field created by the bunches could interact with the surrounding metallic beam pipes and other non-smooth metallic structures within the beam pipes, resulting in the generation of “wake fields,” which act back on the circulating beam, causing the beam oscillation to grow. In cases where the growth of oscillation is stronger than the damping, the oscillation becomes unstable. Since the resulting electromagnetic fields created by the bunches are proportional to the charge of the bunches, the onset of the instabilities and their amplitude are normally current-dependent. Large-amplitude instabilities may cause beam loss, therefore limiting the maximum stored beam current. In an RF cavity, the high-Q spurious resonances of an accelerating cavity are excited by the bunched beam and act back on the beam itself. Each bunch affects the trailing bunches through the generated wake fields in the cavity. Possible coupling of the cavity higher-order-modes (HOMs) with a beam oscillation mode having the same frequency will give rise to instability. Both transverse and longitudinal multi-bunch modes can be excited. Excitation of the cavity HOMs can be mitigated by a careful design of the RF cavity or by utilizing mode dampers comprised of antennas and resistive loads. Tuning of cavity HOM frequencies using plungers and/or by changing the cavity cooling water temperature is being used in many accelerators [182].

When HOM detuning or HOM damping does not raise the instability threshold above the nominal current of a machine, a fast active bunch-by-bunch feedback system can be used to further stabilize the beam. Since this topic is somewhat beyond the scope of this review, we refer readers to [183], [184], and [185].

### D. Novel and Exotic Cavities

#### 1. 1) harmonic Cavities

As mentioned above, the RF frequency of the main RF system must be a harmonic of the revolution frequency; the harmonic number is normally very large for large synchrotrons. This harmonic number is at the same time the number of “buckets” around the machine orbit in which bunches can be placed for acceleration. This is generally referred to as the fundamental RF frequency. The term “harmonic cavity” refers to another RF system operating at a higher harmonic of this fundamental RF. We have already mentioned two cases where a harmonic system can be beneficial. The first is to improve the charge density distribution at flat bottom to minimize space charge tune spread and to modulate the synchrotron frequency distribution inside the bunch to improve stability. Another case for a harmonic cavity is the longitudinal bunch shaping and manipulation before ejection into the next higher energy synchrotron, e.g., inside the CERN PS where acceleration is achieved at up to 10 MHz on harmonics up to 21, while the next higher energy machine, the CERN SPS, has a 200 MHz RF system and thus much smaller buckets. To this end, harmonic cavities at harmonics 42, 84 and 168 were designed, built, and installed (see Fig. 42), in particular to prepare the bunch pattern for the LHC operation, especially the 25 ns bunch spacing. This bunch manipulation is performed at flat top, just before ejection, which allows a fixed frequency system. It allowed the use of a normal conducting vacuum cavity (i.e., without a ceramic gap), which allows for very large gap voltage (hundreds of kV). The CERN PS 40 MHz and 80 MHz cavities were designed and built in the ‘90s and are described in detail in [186]. The large voltage (600 kV at 40 MHz, 1 MV at 80 MHz) and the strong RF feedback (43 dB) allow non-adiabatic bunch rotation to create short enough bunches before ejection to the SPS 200 MHz buckets.

**Fig. 42.**

CERN harmonic cavity.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

Harmonic cavities are installed in many proton synchrotrons for a variety of reasons: 1) to improve the bunching factor at injection fighting the space charge tune spread, 2) to introduce longitudinal Landau damping varying the synchrotron frequency distribution inside the bunches, 3) to introduce controlled longitudinal emittance blow-up, and 4) to manipulate and shape bunches. There are many other uses of harmonic cavities, the description of which would go beyond the scope of this article. Examples include the shaping of the longitudinal phase space in general, and also the gating of field emission cathodes or the reduction of back-bombardment of thermionic guns.

#### 2. 2) wide-Band Cavities

Instead of rapidly tuning the resonance frequency, a relatively new idea is to use a very low Q instead, which allows for operation in a large frequency range without any tuning at all. Cavities with this feature can, for example, be built using amorphous, nanocrystalline magnetic alloys (MA) like Finemet or Metglas. The low Q will, however, lead to larger power needs to obtain the same voltage, but this may be well worth it since there is no need for tuning or a bias current power supply. This technique was pioneered by KEK in the ‘90s for the J-PARC facility [187]. An example of a wide-band cavity is that of LEIR (Low Energy Ion Ring) at CERN [188]. LEIR accelerates Pb ions from 4.2 to 72 MeV/u—the corresponding revolution frequency varies from 360 kHz to 1.42 MHz (2 octaves). The RF system is designed to have an instantaneous bandwidth of almost 4 octaves (350 kHz to 5 MHz), which allows operation with Pb ions at harmonics 1 and 2 simultaneously with the necessarily large frequency swing, and still could allow acceleration of other ion species if required.

Fig. 43 shows the large instantaneous bandwidth in excess of a decade measured for the complete system (blue curve). The resulting effective Q of the system is on the order of 0.5. The CERN PS Booster is now also equipped with a MA prototype system presently under testing for large intensity operation [189]. If fully validated, it could eventually replace both the PSB h=1 and h=2 systems. Fig. 44 shows this prototype system installed in ring 4 of the PSB. Wide-band cavities have the distinct advantage of a large instantaneous bandwidth that does not require tuning the cavity during the acceleration cycle. The downside is a low quality factor that implies larger power for a given gap voltage.

**Fig. 43.**

LEIR ma cavity gap impedance (blue). In the frequency range from 350 khz to 5 mhz it varies from 275 Ω to 560 Ω.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

**Fig. 44.**

Prototype finemet cavity installed in ring 4 of cern's PSB.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

#### 3. 3) deflecting Cavities

A special mode of operation of the deflecting cavities, “crabbing” is envisaged for the LHC luminosity upgrade program [190]. In a high-energy collider like the LHC, very small bunches of counter-running beams are colliding in the interaction points. The beams are normally not colliding exactly head on, but with a small crossing angle in order to minimize beam-beam effects. Due to this non-vanishing crossing angle, only some particles of one bunch will collide with some particles of the oncoming bunch (see Fig. 45, top).

**Fig. 45.**

LHC crabbing scheme.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

If the head and the tail of the bunches are kicked sideways in opposite directions in the crossing plane, the bunches become tilted after some drift, and they start to move sideways like crabs. If this tilt is equal to half the crossing angle at the interaction point, the bunches are again oriented exactly as in a head-on collision and the geometrical loss of luminosity is compensated (see Fig. 45, bottom). The plan to upgrade the LHC to reach larger luminosity contains a number of important elements. In addition to increasing the bunch intensity by an upgrade of the LHC injector chain, stronger final focus magnets are planned with larger apertures (the inner triplet). These will allow working with smaller beam sizes at collision and larger crossing angles. In order to take full advantage of this upgrade, crab cavities are essential [190]. An important additional feature of the operation with crab cavities is the possibility to change the crab cavity voltage during the coast to compensate for the loss of particles (luminosity leveling).

For the construction of crab cavities for the LHC, RF engineers are confronted with an additional difficulty resulting from the proximity of the two LHC beam pipes, which in most of the machines are spaced by only 194 mm. Conventional, elliptically shaped RF cavities have a radius of roughly half a wavelength, which in the case of LHC is not consistent at a frequency of 400 MHz. A special straight section near point 4 is provided for the 400 MHz accelerating cavities (cf.  Fig. 14), but it is desirable that the crab cavities are located upstream and downstream of the high luminosity collision points.

The possibility of designing and fabricating crab cavities compact enough to fit these stringent constraints has recently lead to a challenging joint R&D program. The geometries of 2 of the contenders to become LHC compact crab cavities are sketched in Fig. 46. The “Double Quarter-Wave” cavity (left) will initially be built for vertical crossing, whereas the “RF Dipole” is for horizontal crossing. Both cavities feature a concentrated transverse electric field near the cavity center. The superconducting cavities are made of Nb sheets and will be operated at 2 K. The design of the Helium vessel, the tuners, power couplers, HOM dampers and cryostats is well advanced.

**Fig. 46.**

Compact crab cavities design (left) DQW for vertical crossing and (right) RF dipole for horizontal crossing.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

Crab cavities are transversely deflecting cavities used to optimize luminosity in a proton collider with non-zero crossing angle. Superconducting crab cavities are under construction for the LHC luminosity upgrade.

In 2005, a team of accelerator scientists explored the use of superconducting deflecting RF cavities which was proposed by A. Zholents et al. to use RF orbit deflection to generate sub-ps X-ray pulses [191] for the APS Short X-Ray Pulse (SPX) project at Argonne National Laboratory. In this approach, a horizontal magnetic field creates a correlation between the longitudinal coordinate of electrons within the bunch and their vertical angles, producing a “chirped” beam (Fig. 47). The cavity frequency is a harmonic h of the ring RF frequency. The second crab cavity cancels the deflection, thereby limiting the deflection to a part of the ring. The required deflection can be achieved with h=4−8 (1.4-2.8 GHz) and deflecting voltages of 2-4 MV. With such parameters, superconducting RF (SRF) technology is required for CW operation.

**Fig. 47.**

Schematic of the RF deflection approach to producing short pulses.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

In collaboration with Jefferson Laboratory, the Argonne team prototyped and successfully tested several on-cell-damping single-cell cavities in vertical and horizontal configurations. The lower-order modes (LOM) damper utilized a waveguide damper either on the beam pipe (Mark I) or on the body of the cavity cell (Mark II). Mark II cavities are shown in Fig. 48. Vertical test measurement results of both prototype cavities are shown in Fig. 49. For more details, see [192]–[193][194], [195], and [196].

**Fig. 48.**

Pair of SPX mark II deflecting cavity.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

**Fig. 49.**

Mark I and mark II vertical prototype cavity test results.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

#### 4. Planar Accelerating Structures

In the mid-1990's, there was a growing interest in the development of very high gradient accelerating structures with a focus on the development of planar RF structures. The fabrication of these high-frequency planar structures was based on deep X-ray lithography (LIGA), a German acronym that stands for Lithographie, Galvanoformung and Abformung [197], a technique initially developed for microelectromechanical systems (MEMS) components, sensors, actuators and micro optical components [198]. Planar RF structures consist of two or more metallic or dielectric slab materials supporting “pill-box” type cavity resonators. The slab can be in direct contact, thus forming closed rectangular strictures (Fig. 50) [199].

**Fig. 50.**

Basic arrangement of planar structures.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

Unique features of LIGA-assisted planar RF structures such as high aspect ratio, high-degree fabrication precision, and fractional tolerances in the micrometer regime made it well suited for very high frequencies at around W-Band. This approach was explored by a group of researchers at Argonne National Laboratory who conducted R&D in early 2000 on side-coupled, multi-periodic, low-energy structures [200] with inherent alternative-phase (AP) focusing on the study of a 50 MeV electron linac powering a micro undulator [201]. Several constant gradient 94-GHz structures were fabricated and measured (see Fig. 51). In 2008, Nassiri and Kustom (ANL) proposed the idea of fabricating a CERN CLIC-type accelerator (30 GHz) on a substrate using LIGA fabrication process [202] (see Fig. 52).

**SECTION IX.**

## **Progress in RF Power Generation**

### A. CW High Power Klystrons At CERN

The Large-Electron-Positron collider (LEP) was approved by the CERN Council in 1981 and operation began in 1989. However, preliminary work on LEP RF equipment had already commenced in the ISR/RF group in 1978, six years before the ISR (Intersecting Storage Rings) were shut down. For the power testing of the first prototypes of the proposed LEP RF acceleration structure (coupled cavity assembly), couplers, 4-port circulator, absorbers, waveguide components etc., CERN had to procure in a reasonably short time an RF source which could generate a CW output power of about 500 kW.

**Fig. 51.**

A 94-GHz liga-fabricated constant gradient structure.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

**Fig. 52.**

A 30-GHz clic concept on a substrate.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

Two years before the LEP/RF activities commenced, the Positron-Electron-Project (PEP) with a nominal energy of 18 GeV/beam was authorized at SLAC. At that time it was decided that the required RF power of max. 6 MW should be generated by 12 klystrons, each delivering a rated output power of 500 kW at 353.2 MHz. A frequency in the 350 MHz range was chosen because of the SPEAR klystrons’ operating frequency, which was 358.5 MHz. Thus, hardware such as waveguides, driver amplifiers, absorbers and measuring equipment were already available. The CW output power of the SPEAR tube was 125 kW and its efficiency about 50%. Therefore, a new type of klystron with the required 500 kW output and efficiency in excess of 60% was developed and manufactured at SLAC [203]. This klystron produced the highest CW output power in the UHF frequency range at that time. To achieve an efficiency ≥60%, a second harmonic cavity was inserted in addition to the four fundamental ones.

It was therefore obvious at that time that only SLAC could deliver with a reasonably short delay and at relatively low cost the RF source with the CW output power required by CERN. After negotiations between CERN and SLAC, an order was placed in 1979 and delivery of the klystron to CERN occurred one year later. In order to not delay the production of the 12 PEP klystrons, a few of which still had to be manufactured in 1979, SLAC employees had to work overtime to build the CERN tube.

Dictated by the LEP circumference and the circumferences of its injectors, the closest possible LEP RF operating frequency with respect to the PEP one was found to be 352.21 MHz, i.e., 1 MHz below the operating frequency of the klystron acquired from SLAC. Because of its −1 dB bandwidth of less than ±500 kHz, the tube had to be re-tuned to the lower frequency at CERN. By means of the tuning mechanisms fitted to each cavity, the resonance frequencies of all fundamental cavities and that of the 2nd harmonic one were lowered by 1 MHz and 2 MHz, respectively.

The tube served for many years to test LEP RF equipment, but is primarily used for the conditioning of half of the 128 copper accelerating assemblies.

In the second half of the 1970's, Positron-Electron-Tandem-Ring-Anlage (PETRA), a 19 GeV/beam storage ring, was being built at DESY with an expected maximum RF power requirement of 10 MW [2], [204]. For practical and economic reasons, the PETRA RF frequency was set to 500 MHz, the same as that of the 7.4 GeV synchrotron DESY and the 3.5 GeV storage ring DORIS. In order to keep the total number of klystrons to be installed in PETRA reasonably small, the decision was made to procure a klystron with the highest possible output power and efficiency that could be developed and constructed at that time by the industry.

After the successful construction and reliable performance of the PEP tube, and after an exchange of information with SLAC engineers, the klystron manufacturer VALVO (later renamed PHILIPS-RHW) agreed to develop and build a 500 kW, 500 MHz klystron with an efficiency ≥60%. According to the scaling law, which links klystron output power and operating frequency (Poutf2=const.), the RF surface losses were supposed to be twice as high as those at the PEP tube [205]. The cavities of all klystrons referred to here were of the re-entrant, single-gap type. Additional features of the PETRA klystrons and also of the future LEP ones, with respect to the PEP tubes, were the use of a tungsten dispenser cathode instead of a barium oxide one, and the integration of a modulating anode in the electron gun assembly. By means of the anode voltage, the electron beam and thus the output power could be varied from zero to its nominal value without changing either the beam voltage, focusing currents or the RF drive power.

During the years 1978–80, 20 klystrons were delivered by VALVO according to the DESY specifications, with rated CW output power levels of 540 kW and an average efficiency of 60% [204]. As mentioned above, the LEP RF frequency was chosen to be 352.21 MHz, which corresponded to harmonic 31,320. In order to reach and maintain the maximum specified beam energy of 55 GeV at a current of 3 mA/beam in LEP1, a total RF source power of 16 MW was required.

Encouraged by the successful construction and reliable performance of the PEP and PETRA klystrons, CERN addressed a call for tender to two European tube manufacturers, Thomson-CSF (later renamed THALES) and VALVO, to develop, construct and test a prototype LEP1 klystron with a nominal RF output power of 1 MW. This was indeed twice the output power of the PEP and PETRA tubes, but the surface losses in the output cavity were supposed to not be higher than those in the PETRA tube because of its lower operating frequency (scaling law). The dissipation capability of the collector, however, had to be roughly twice as high as that of the two other tubes.

Both firms agreed to make an offer, and one prototype klystron was ordered from each. The specified operating position of the prototype tube was optional, i.e., either vertical or horizontal, although the series klystrons would have to be horizontal due to the restricted height of the tunnels where they would be installed. The main objective for CERN was to get proof that a 1 MW klystron, operating reliably at an efficiency of ≥65%, could be realized. Thomson-CSF, who had to develop the tube from scratch, decided to offer the horizontal version. VALVO, however, scaled their vertical PETRA tube to the higher output power and lower operating frequency. Their tube was delivered to CERN in 1981. It was the first tube ever built to deliver a CW output power of 1 MW in the UHF frequency range. The Thomson tube was delivered one year later; both tubes met the CERN specifications.

Just like the 500 kW SLAC tube, both 1 MW prototype klystrons were installed in test stands for the testing and conditioning of LEP1 RF hardware, including superconducting cavities for the future LEP2.

After the successful acceptance tests of the 2 prototypes, CERN ordered 9 horizontal series klystrons from each of the two European tube manufacturers (mentioned above), 16 of which were required in LEP1. The specifications asked for a DC-to-RF conversion efficiency of 68%, with the amendment that the manufacturer would receive an additional payment of 1% for each percent of higher efficiency, but also a penalty of the same amount at lower klystron efficiencies.

By April 1985, three LEP1 klystrons from each firm had been delivered, all of which had successfully passed the acceptance test procedures at CERN [206]. Due to the expense, provision was not made at that time to protect the LEP1 klystrons against reflected signals by installing a 4-port isolator in each of their output lines. Only one of these cumbersome and expensive isolators had been purchased from the American company Raytheon for test purposes. Main parameters of the LEP1 klystrons are shown in Table IV.

**Table IV**Main parameters of the lep1 klystron at rated output power

A complete mock-up of a LEP1/RF unit, mainly consisting of an HV power supply and its interface, two 1 MW klystrons, a WR-2300 waveguide RF power distribution system, and 16 copper accelerating assemblies, was built up to scale in one of CERN's experimental halls. The main difference between the mock-up and the RF units, as projected for LEP, was the insertion of the available 4-port isolator in the output line of one of the two klystrons. The purpose of the mock-up was to gain experience in the operation of an RF unit prior to the installation in the tunnel.

During the first test run at high RF power in 1985, the output cavity and window of the unprotected klystron was destroyed by reflected signals. Shortly after that incident it was observed for the first time that at output power levels ≥700 kW and certain operating conditions, some klystrons produce sidebands beside the main output signal. The spectrum lines of these sideband signals were spaced by about 2 MHz and the amplitude of the highest ones were less than 20 dB below the fundamental signal. It could be observed that the first bunching cavity, tuned for reasons of efficiency to a frequency about 2 MHz above the operating one, was then excited at its resonance frequency. This was very likely caused by returning electrons. Thus, velocity modulation occurred at two frequencies, 352 MHz and 354 MHz, and due to the very non-linear transfer characteristic of the klystrons, intermodulation products were generated. The energy content in these sideband signals corresponded to power levels of several 10 kWs, sufficiently high enough to destroy a klystron.

Fortunately, in the same year, high-power Y-junction circulators became available and were delivered by the company ANT (later renamed AFT) to DESY and successfully tested there. The advantages of the Y-junction circulator as compared to the 4-port isolator are its lower price and smaller size. Its isolation against reflected signals is ≥20 dB at a bandwidth of ±3%.

Eventually, in 1986, the LEP management decided to purchase 16 1 MW Y -junction circulators from ANT, to be installed in the klystron output lines of the LEP1/RF copper system. It turned out that circulators not only protected the klystrons against reflected signals, but the tendency of the klystrons to produce sidebands could also be reduced by detuning the circulator's magnetic field. By doing this, the match to the klystron's output changes, which not only resulted in lower tube efficiency, but also in a much lower tendency to generate instabilities.

LEP phase I operation started in 1989 and ended in 1995. During this period, the beam energy was centered on 45.6 GeV to study properties of the Z0 boson. In total, 8 klystrons had to be replaced by 1995, mainly due to faults in the electron gun. Four of them had to be removed after only a few hundred hours of operation, an occurrence known as “infant mortality’ at newly developed tubes.

In 1996, the LEP Phase II (LEP2) operation started. The modular layout was very similar to that of LEP1, the main difference being the substitution of the copper cavities by superconducting ones. Although the LEP1 frequency of 352.21 MHz was considered rather low for SC cavities, it was nevertheless retained to maintain compatibility with existing hardware [207]. Two klystrons were still powered by an HV power converter with a rated DC output of 100 kV and 40 A. A program had already been launched with industry in 1990 to increase the maximum output power of the klystrons by making full use of the rated capacity of the HV power converters. Besides the conditioning of the klystrons to the higher operating voltage and current, and an increased cooling water flow, only minor modifications were required. The operation at a DC voltage and current of 100 kV and 20 A, respectively, resulted in a maximum klystron RF output power of 1,300 kW, corresponding to a DC-to-RF conversion efficiency of 65%.

By 1997, the number of installed superconducting RF units had progressively increased. Half of the copper units were replaced by superconducting ones. The final LEP2/RF configuration consisted of 18 superconducting and 4 copper units. With this layout, a final circumferential voltage of 3660 MV was reached corresponding to a maximum beam energy of 104.5 GeV—well beyond the threshold for the W boson production [207].

The RF power for the 22 LEP2/RF units was supplied by 44 Klystrons of the 1,000 kW and 1,300 kW types, respectively. In addition to the two suppliers, which produced the LEP1 klystrons, the firm EEV (later renamed E2 V) made a bid for the LEP2 type ones. The contracts for the delivery of 1.3 MW klystrons were then split between the three tube manufacturers.

The EEV tubes, which also fulfilled the CERN specifications, differed from those of the 2 other manufacturers by the number of cavities. They were equipped with 6 instead of 5 cavities, including a 2nd harmonic one. Additionally, the first bunching cavity, i.e., the one next to the input cavity, was loaded via a loop by a water-cooled absorber. The Q value of this cavity was thus lowered from above 10,000 to below 1,000, and as a result no intermodulation products (sidebands) could be observed in the output signal at the EEV tubes. When the swept response of a klystron with an unloaded first bunching cavity was displayed on a network analyzer, it could be observed that the highest internal gain occurred at the frequency to which this cavity was tuned. Actually, its gain was about 10 dB higher than that of the input cavity, which was tuned to the operating frequency. By loading this cavity, as done by EEV, its internal gain was reduced by >10 dB. As a result, sideband instabilities were never observed under normal operating conditions in the output signal of the EEV tubes.

In its last 3 years of operation, 44 klystrons were installed in LEP. During its entire operation time from 1989 to 2000, 31 klystrons had to be removed from their operation positions for various defects. Eighteen (58%) defects were related to the electron gun assembly (cathode with its heater filament, HV feed-throughs, modulation anode and HV insulation ceramic), eight (25%) to vacuum leaks in body and collector, and the remaining 5 to focusing coils and output windows.

Seventeen of the LEP klystrons are going to be reused in LINAC4, presently under construction at CERN, and some of them were given to various physics laboratories. Because of the availability of 352 MHz, 1.3 MW klystrons from three manufacturers (see Fig. 53)—the synchrotron light sources ESRF in Grenoble and APS at Argonne National Laboratory, both constructed in the early 1990's—equipped their RF systems with the same type of tubes. For the same reason, the RF frequency of the synchrotron light source SOLEIL was also set at 352 MHz, but eventually solid-state amplifiers have been used there instead of a klystron.

**Fig. 53.**

A 352 mhz/1.3 mw CW klystron.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

Although LEP operation ended in 2000, the Large Hadron Collider (LHC) had already been approved in 1994. As the LHC/RF frequency was chosen to be 400 MHz twice that of SPS, the LEP klystrons could not be reused in LHC. As in 1980, when an RF power source was procured from SLAC to test LEP RF hardware, a similar power source was required in 1996 for the testing and conditioning of LHC RF equipment. This time a 500 kW klystron, operating at a frequency of 400 MHz instead of 352 MHz, had to be procured by CERN.

Consequently, while on sabbatical leave at SLAC in 1995, H. Frischholz proposed a redesign of the PEP1 klystron so that it could be operated at 400.8 MHz—the LHC RF frequency [208]. By doing this, more than 80% of the original and still available PEP1 tube parts could be incorporated. Among them were major components, such as the collector with its water jacket, the electron gun assembly, the focusing solenoid, the oil tank and support girder, all five stainless steel cavities, and the coax-to-waveguide output transition. Only the two latter components had to be matched to the higher operating frequency. Given the availability and use of these components, the engineering costs could be reduced substantially.

In 1995, the two laboratories agreed to build the LHC test tube at SLAC and ship it to CERN in 1996. Prior to its shipment, the tube was high-power tested. As predicted by computer simulations, the DC-to-RF conversion efficiency, an important parameter for high-power sources, was measured to be 64.5% at rated output power, noticeably higher than that of its predecessor, the PEP1 tube.

The counter-rotating proton beams in the LHC will eventually be accelerated to their final energies of 2×7 TeV by two identical 400 MHz RF systems. The RF power source required for each beam comprises eight 300 kW klystrons, which were developed and constructed by THALES. An important parameter for the LHC tubes has been their group delay, which was specified to be ≤120 ns within the frequency range of f0±1 MHz. In order to get the highest possible efficiency and gain at the aforementioned klystrons, all input and output cavities had to be tuned to or close to their respective tube operation frequency (f0), whereas their fundamental buncher cavities had to be adjusted a few MHz above f0 and each 2nd harmonic cavity slightly below 2f0.

A lower group delay is obtained when the bandwidth of the tube is increased. This had been achieved by tuning the input cavity—of which the loaded Q is <200—sufficiently below and the first buncher cavity above f0. The second harmonic cavity, which enhances the efficiency by 4-5%, does not contribute to the group delay of the tube. Virtually no increase of the group delay is caused by the penultimate cavity, tuned >2 MHz above f0, nor by the output one, which is tuned to f0, but exhibits a loaded Q of about 35. Of course, the increase of bandwidth results in a lower gain and efficiency, both of which were therefore specified for the LHC tube to be only 37 dB and 62%, respectively [209].

### B. Magnetrons

The magnetron is another vacuum tube technology that was developed in the 1930's then upgraded to higher power levels during World War II for the early radar systems. Many historians believe the magnetron was one of the more important inventions aiding the Allies in their victory. The magnetron is an oscillator, not an amplifier, but it can be injection locked with a driving signal that is a fraction of the output power [210] and [211]. In the absence of injection locking, the frequency stability of a magnetron is orders of magnitude below that required for driving accelerator cavities. The resulting injection “gain” allows the magnetron to be a viable last stage in the RF power source. A magnetron is one of the most efficient sources for generating microwave/RF power (approaching 70-80% DC to RF), and for this reason much effort has gone toward using this RF generator for accelerator applications. The high efficiency will considerably reduce the operating electricity cost over the life of the accelerator. In addition to efficiency, the attractive characteristic of magnetrons is the cost per watt of RF output power. Magnetrons are the devices used in ubiquitous kitchen microwave ovens, industrial heating systems, and military radar applications. The cost of a kitchen 1 kW magnetron is under US10andsimple,ready−to−usecountertopovensareavailableatunder100 at this power level. Industrial 80 kW continuous wave (CW) heating magnetron sources at 915 MHz are commercially available for approximately $1/watt.

Until recently, the use of magnetrons for powering RF structures for accelerators has had limited usage due to the variability of frequency of oscillation and inability to dynamically control output power. A recent investigation at Fermilab [212] utilizing phase modulation (PM) has resulted in a patent and opened the possibility for a highly accurate vector controlled RF source by injection locking a magnetron using PM to amplitude modulate the output carrier with phase feedback for phase stability while moving the balance of the RF power into the Bessel sidebands. A block diagram of magnetron PM modulation scheme is shown in Fig. 54. This technique is particularly useful in superconducting RF (SRF) cavities where the cavity bandwidth is narrow enough to reject the sideband components of the signal, redirecting them to be absorbed by a circulator load.

**Fig. 54.**

Block diagram of magnetron PM modulation scheme.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

The modulation frequency can be arbitrarily chosen to avoid exciting nearby secondary oscillation modes in a multi-cell cavity.

Injection “gains” of 15 to 20 dB have been experimentally achieved, which makes this technique comparable in gain to IOTs, tetrodes, triodes, and final stages of solid-state amplifiers. As with any RF power source, the DC power to the amplifying device must have low harmonic and spurious responses, as these will likely flow through the power device to the load. For accelerator purposes, some additional filtering and interface hardware to the power supply is essential for a cleaner spectral output and would require an additional 1−2 per watt for the final product.

The apparatus for this experiment utilized a commercial 1.2 kW magnetron and power source operating at 2.45 GHz, the frequency of a kitchen microwave oven. The apparatus is shown in Fig. 55. This was the most economical means of procuring the experimental hardware. Researchers at Thomas Jefferson National Laboratory have been pursuing the use of magnetrons for years and went the extra step of fabricating a single cell SRF cavity at this frequency [213]. The cavity was loaned to Fermilab for the complete feedback test. The final achieved results driving the cavity in CW mode are: 30 dB of dynamic range, 0.3% rms amplitude stability, and 0.26 degrees rms phase stability. See plots in Fig. 56. It is believed these numbers can be improved with further experimentation.

**Fig. 55.**

Test apparatus (top) vertical SRF test stand and (bottom) magnetron and injection locking hardware.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

**Fig. 56.**

High-level dynamic range (top): 0 db (blue), 3 db (red), 6 db (green), carrier frequency variation is due to microphonics. The FM loop around the generator and system follows the resonant frequency, hence the variation in peak marker frequencies of 50-75 hz. Other close in sidebands are from microphonics sources. 30 db was demonstrated.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

Via a grant from the DOE SBIR program, Calabazas Creek Research Inc. (CCR) has been awarded a Phase II grant to pursue the design and fabrication of a magnetron at 1.3 GHz at 100 kW with a 10% duty cycle. This frequency was chosen as a number of SRF cavities at this frequency will be available for testing at Fermilab. Fermilab will enter into a Cooperative Research and Development Agreement (CRADA) with CCR to complete the project. Once tested at CCR's facility, the magnetron will be transferred to Fermilab for the ultimate test of driving a dressed 9-cell 1.3 GHz SRF cavity.

### C. Tetrodes

Fifty years ago, tetrode amplifiers dominated TV, and in particular, audio broadcast transmitters for short-wave global communication and regional AM and FM broadcast transmitters in the frequency range of below 1 MHz to 300 MHz. Most of the accelerator application transmitters are still using the exact same design principles developed then, but significant advances have been made both in the overall power reach of these systems and in vacuum tube technology for better lifetime and increased reliability (e.g., thoriated W cathodes, pyrolytic graphite grid).

**Fig. 57.**

The 20 tetrode amplifiers of the “siemens” plant driving half of the SPS 200 mhz installation with up to 2 mw RF. Photo 1974 CERN.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

**Fig. 58.**

Illustration of the difference between conventional tetrodes (left) and diacrode (right), taken from the original publication [213].

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

Today the SPS tetrodes amplifiers chains provide a power of up to 4 MW to the 4 SPS cavities (cf.  Fig. 57). Two separate systems provide up to 2 MW each, one of them, the “Siemens” system, consisting of 20 high power tetrodes of type RS 2004, is shown in Fig. 57. The 2nd system, referred to as “Philips” system, is built from 68 tetrodes of type YL1530. A third system is presently under construction for the planned SPS upgrade [214]. Another example of relevant and remarkable progress in tetrode technology is the Diacrode, developed by Thomson Tubes Electroniques [215]. The principle improvement with respect to the conventional power tetrodes is the symmetric extension of the active grid area, the principle of which is depicted in Fig. 58. A single diacrode can produce about 1 MW RF at 200 MHz.

Diacrodes are considered for the aforementioned SPS power upgrade, but relevant experience exists at Los Alamos for LANSCE. Fig. 59 shows a photograph of the prototype installation with two TH628L Diacrodes, which was successfully commissioned in 2014 [216].

**Fig. 59.**

Double diacrode amplifier installation at LANSCE [214].

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

Tetrodes are conceptually old but still “modern” in large particle accelerators, since no other economic way of producing the necessarily large RF powers has been fully validated today. Progress has been made in the technology to fabricate these delicate vacuum electronic devices, however. The invention of the Diacrode in the late ‘90s is a remarkable example.

### D. Iots

The Inductive Output Tube (IOT), invented in 1938 by Andrew Haeff, is not a new device. However, due to manufacturing difficulties and the intense competition from velocity modulated tubes such as klystrons, the IOT stayed dormant until the beginning of the 1980's, when significant improvements in manufacturing technologies, particularly the use of pyrolytic graphite, made it possible to construct robust grids capable of being operated at high temperatures. Early transmitters all used small UHF tetrodes as drivers, but recent improvements in solid-state amplifiers increased the reliability of the complete IOT transmitter, and the lower gain of the IOT compared to the klystron was no longer a major issue.

The beam current from the IOT cathode is density modulated by the application of an RF voltage between the cathode and a grid. The bunched beam is accelerated towards the anode and directed through an output cavity where the beam is decelerated and the energy is transferred to the output circuit. The IOT offers improved gain linearity, low pushing factors and high efficiency, particularly when compared to amplifiers, which saturate at nominal power when used in applications, which require a power overhead for regulation. The original expected operating life of an IOT was estimated to be 30,000 hours, however, over the last decade lifetimes approaching 100,000 hours have been achieved [217] and [218]. Since the mid 1990's, the IOT has replaced the klystron for new transmitters and virtually all existing TV klystron sockets. Today there are more than 1000 IOTs in TV broadcast services.

For a long time, the IOT was targeted at broadcast applications with output power levels limited to about 80 kW, however, scientific applications such as proton accelerators and synchrotron light sources require UHF amplifiers with a power capability from a few 100 kW to MWs. Traditionally, the amplifier of choice for high power applications was the super power klystron, but the higher efficiency of IOTs, particularly at the point of operation, pushed the idea of an equivalent high power IOT.

Los Alamos National Laboratory commissioned Communications and Power Industries (CPI) to design and manufacture a 1 MW, 700 MHz IOT [219], (Fig. 60), for the APT proton accelerator. To reduce the voltage of the IOT, the cathode was designed to produce a cylindrical sheet beam to interact with a higher order mode (TM020) output cavity. The IOT was designed to operate at 45 kV and had a target efficiency of 73%. While manufacturing difficulties unfortunately prevented full power operation, short-pulse operation confirmed the modeling that had been carried out, and the tube delivered >900 kW with just 31 kV. Furthermore, the results showed that the efficiency only dropped slowly as the output power was reduced. The APT project was abandoned in 1999 and with it the HOM-IOT development.

**Fig. 60.**

CPI hom-IOT (VHP-8330) during test.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

Diamond Light Source, which became operational in 2007, was the first synchrotron light source to use IOTs. The three storage ring amplifiers each combine four 80 kW IOTs to achieve a nominal requirement of 300 kW CW [220], each supplied from a common power supply. The next synchrotron light source built with IOTs was ALBA [221]. ALBA operates 6 amplifiers for the storage ring each with two IOTs combined.

Other accelerator facilities, including CERN, Brookhaven, Daresbury Laboratory, Willy Wien, and Elettra now also use IOTs. The majority of broadcast IOTs have been manufactured by Thales Electron Devices (Thales), E2 V, L3 and CPI, and for accelerator applications, the IOT based amplifiers are all largely based on broadcast tubes with the power limited to around 90 kW. Photos of CPI HOM-IOT and L3/Thales preliminary designs of two MB IOTs tubes are shown in Fig. 61.

**Fig. 61.**

Preliminary designs of the two MB iots from l3 and cpi/thales (images courtesy of l3 and cpi/thales).

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

**Table V**Key parameters of the iot prototypes under construction

Construction of the European Spallation Source (ESS), a 5 MW average power proton linac, started in 2014 [222]. The latter part of the linac will require 84 RF sources, and ESS has launched development contracts to design and manufacture two IOT technology demonstrators (see Fig. 61) for delivery in 2016. The contracts are with L3 Communications and a consortium consisting of Thales and CPI. See Table V for key parameters. The aim of the IOT development is to produce a high-power, high-efficiency multi-beam IOT to reduce the overall power consumption of the linac. Compared to the conventional klystron, the improved efficiency of the IOT will result in power savings of >3 MW for ESS and the technology is similarly applicable for existing light sources as well as future projects.

Future accelerators, e.g., FCC and ILC, are expected to have increasingly stringent requirements on energy usage, space, and reliability, and may require yet more innovative designs to further increase amplifier efficiency. It is also hoped that the ESS MB-IOT development may open up the possibility of improved efficiency for light sources as the multi-beam design lends itself to scaling to different frequencies and power levels.

### E. High Power Solid-State Amplifiers

RF solid-state amplifiers (SSA) are being increasingly used instead of electronic vacuum tubes to feed accelerating cavities with radio frequency power in the 100 kW range. Power is obtained from the combination of hundreds of transistor amplifier modules. Such SSAs were developed and implemented at a large scale at SOLEIL to feed the booster and storage ring cavities [223] and [224]. At ELBE FEL, four 1.3 GHz–10 kW klystrons have been replaced with four pairs of 10 kW SSAs from Bruker Corporation (now Sigmaphi Electronics, Haguenau/France), thereby doubling the available power [225]. The company Cryolectra GmbH (Wuppertal/Germany) delivers SSA solutions at various frequencies and power levels, such as a 72 MHz–150 kW SSA for a medical cyclotron [226]. Following a transfer of technology from SOLEIL, the company ELTA (Blagnac/France), a subsidiary of the French group AREVA, has delivered seven 352.2 MHz–150 kW RF SSAs to the ESRF [227] and [228]. A compact SSA making use of a cavity combiner with fully planar RF amplifier modules that are suited for mass production is under development at the ESRF. The aim is to reduce the required space and fabrication costs1.

#### 1. 1) example of a 150-Kw SSA for the European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in France

The ESRF has been operating four 1.1 to 1.3 MW 352.2 MHz klystron transmitters using the LEP type klystrons presented in Section IX-A. Out of the original three manufacturers, only one still produces this type of klystron, and in the early 2000's, only a few “smaller” customers remained, which was likely not a strong case for manufacturers to invest into the production of such klystrons long-term. Seeing the potential risk of obsolescence of these klystrons, the ESRF figured that it was necessary to be prepared for an alternative RF power source in order to safeguard the operation of the facility. Following SOLEIL's great success with the development and operation of 180 kW SSAs [223], it was decided that an initial series of seven SSAs in the frame of the ESRF upgrade phase I would be implemented between 2009 and 2015. Fig. 62 shows one of the seven new 150 kW SSAs at ESRF.

**Fig. 62.**

One of the 150 kw–352.2 mhz solid-state amplifiers obtained by combining the power of 256 RF transistor amplifier modules each delivering up to 650 w (seven such SSAs are in operation at esrf, provided by elta/areva following a transfer of technology from soleil). DC to RF power conversion efficiency is denoted by η.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

Four SSAs have replaced the booster klystron transmitter, and each of the three remaining SSAs feeds one new Higher Order Mode (HOM) damped cavity in the ESRF storage ring [227] and [228]. Such an SSA combines the power from as many transistor modules as needed to provide the required nominal output power for one cavity with a given safety margin: 256 modules in the example shown in Fig. 63.

**Fig. 63.**

Development of a fully planar 700 w RF module at ESRF suited for cost-effective mass production.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

#### 2. 2) transistor and RF Circuit

Thanks to the latest developments in high power transistors, such as the laterally diffused metal oxide semiconductor field effect transistor (LDMOS FET) and, in particular, the latest sixth generation devices with 50 V drain polarization, it is now possible to generate several 100 W up to 1 kW in CW with a single RF module for frequencies up to about 1 GHz. Such transistors are manufactured by NXP (Eindhoven/Netherlands) and Freescale semiconductor Inc. (Austin Texas/USA). The ELTA/SOLEIL SSA implemented at ESRF uses the BLF 578 transistor from NXP, which in fact contains two transistors with a common source that are operated in push-pull in class AB. This allows a good “class B” efficiency to be obtained while the push pull operation provides a low harmonic content.

The RF modules are fed with the unbalanced (unsymmetrical) RF signal from an incoming coaxial cable, which is transformed by a balun circuit into two RF signals that are 180° out of phase and drive the pair of transistors. The matching circuit, together with the bias circuit, determine the class AB working point to reach about 1 dB gain compression and a maximum efficiency of about 68–70% at a nominal output RF power of 650 W for the module shown in Fig. 58. Each RF module is protected by a circulator with a 1200 W load against reverse power, and can therefore withstand operating with full reflection. The small amount of power leaking backwards through the circulator slightly affects the gain; however, the impact is negligible when operating the device under normal conditions with up to 30% power reflection. The seven ESRF SSAs have been designed such that no power circulator is needed at an output of 150 kW after combining all of the RF modules. Each RF module is integrated in an individual shielded case. Sensors monitor the temperatures of the transistor socket and the load. The drain current of each pair of transistors is also monitored. These parameters allow the identification of damaged modules during operation.

For the SSA under development at the ESRF, the fully planar 700 W RF module in Fig. 63 has been designed, and a series of these has been produced to equip a 75 kW prototype SSA [229]. Hand soldering has been almost completely avoided by implementing a planar balun concept from Motorola, by replacing the RF drain chokes with planar quarter-wave transmission lines and minimizing the number of components, all of them surface-mounted devices (SMD) and prone for automated manufacturing. All of these measures allow cost-effective series production of the RF modules.

With a gain dispersion of 19.8±0.6 dB and a phase dispersion of ±6∘, a good combining efficiency is expected. Many factors contribute to these dispersions, such as the transistor dispersion and other components’ parameters, as well as geometrical tolerances. The latter, however, is minimized by the automated pick-and-place technique. Apart from the gate bias, no other parameter has been tweaked. There is still room for improvement in the achievable efficiency, which is still lower by 3% as compared to the ELTA/SOLEIL RF module [229]. R&D is ongoing within the collaboration between the ESRF and Uppsala University for the optimization of the circuit board.

#### 3. 3) power Splitters

Power splitters are key components, designed to distribute the RF power from the drive amplifiers to the individual RF modules with minimal amplitude and phase dispersion. Although an ideal (matched, reciprocal, and lossless) power splitter is not realizable, there are power splitters that can satisfy two of the mentioned properties. Power splitters such as T-junction, resistive, and the Wilkinson are the three most common devices with unique characteristics. The lossless T-junction, for example, is simply three transmission lines connected at a single junction. This junction has a reactance component due to fringing fields and higher order modes. The lossless T-Junction could be a reciprocal device but lacks the ability to provide isolation between the output ports and to be matched at all ports. The inability to be matched at all ports is due to the constraint that the impedances of at least two of the three transmission lines will need to differ in order to achieve the required power splitting. Thus, matching techniques such as the quarter-wave transformer are needed to maintain a matched system.

Resistive power dividers can be employed to ensure the same impedance is achieved at all ports, however loss is then introduced to the power splitter. Since the network is lossy, the resistive power splitter can simultaneously be matched at all three ports. However, the two output ports will most likely not be isolated.

The Wilkinson power splitter, which was proposed by Ernest Wilkinson in 1960, provides isolation between the output ports, can be matched at all ports, and becomes lossless when the output ports are matched [230]. The design is comprised of a transmission line (typically micro strip or stripline) that has been split into a specific number of transmission lines, each one a quarter-wavelength long. In Wilkinson's original proposal, a shorting plate is used at the input to connect each of the transmission lines. Resistors are connected between each output transmission line and a common junction. When the outputs are connected to match loads for an equal split Wilkinson, the voltages along each output transmission line are of the same magnitude and phase. This causes the connecting resistors to have no voltage drop across them, and consequently, dissipate no power [230].

Un ejemplo del diseño de Wilkinson para un divisor adaptado de 352 MHz que distribuye la potencia del variador sin reflejos se puede construir con transformadores de un cuarto de onda como se muestra en la figura 64 . Los divisores Wilkinson en la Fig. 64 (abajo) tienen resistencias adicionales que absorben las señales diferenciales y, por lo tanto, desacoplan los brazos salientes entre sí.

**Figura 64.**

Divisores de línea de banda RF combinados que utilizan transformadores de cuarto de onda; (arriba) divisores de línea SOLEIL 10 y 8 (tapas removidas) [223] y [224] ; (abajo) divisores wilkinson en la SSA en desarrollo en el ESRF.

[Ver todo](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

#### 4. 4) Combinadores de potencia

Los SSA a menudo se construyen con varias etapas de combinadores de potencia que usan transformadores de un cuarto de onda como los divisores que se muestran en la Fig. 64 , excepto que se operan en reversa y las estrías se reemplazan con líneas de transmisión que se adaptan a niveles de potencia más altos, en su mayoría más grandes lineas coaxiales. En cuanto a los divisores de potencia, los transformadores de un cuarto de longitud de onda garantizan que el árbol del combinador coincida en impedancia con la salida de alta potencia conectada, siempre que todas las entradas estén en50 Ω , que es el caso gracias al sistema de circulación / carga en la salida de cada módulo amplificador de RF. Sin embargo, como los combinadores no son direccionales, cada amplificador individual no ve individualmente una impedancia coincidente. Solo cuando todos los módulos de RF funcionan en modo común, es decir, con igual amplitud y fase, la señal de suma que regresa de todos los demás módulos a un módulo dado está en oposición de fase y cancela exactamente su propia reflexión. De este modo, el modo común coincide virtualmente y la potencia total de todos los módulos de RF alcanza la salida del combinador. Cualquier señal diferencial se distribuye por todo el combinador y se disipa en las cargas circuladoras de los módulos RF individuales.

En la mayoría de los SSA de alta potencia existentes, la potencia de los módulos amplificadores de RF individuales se combina mediante varias etapas de combinadores coaxiales en cascada. Los SSE SOLEIL y los SSA de 150 kW en funcionamiento en el ESRF se construyen literalmente alrededor de árboles combinados coaxiales que se convierten en 'torres' de amplificadores en el ensamblaje final. Como se muestra en la Fig. 63 , la potencia de dos de estas torres de 75 kW se combina además para alimentar hasta 150 kW en una guía de onda WR2300 saliente.

Se está desarrollando un combinador de cavidades compacto de una etapa en el ESRF [227] y [228] .

Como se muestra en la Fig. 65 , sumi010La resonancia tiene una distribución homogénea de campo longitudinal y azimutal. Para la aplicación ESRF de 352.2 MHz, la pared cilíndrica exterior está equipada con seis filas verticales de 22 bucles de entrada distribuidos alrededor de la circunferencia. En total, 132 módulos de transistores como los que se muestran en la Fig. 63 , que suministran hasta 700 W cada uno, se conectarán a estos bucles de acoplamiento. Se espera que la potencia de salida total esté entre 80 kW y 90 kW.

**Figura 65.**

Fuertemente cargado mi010resonancia de un resonador cilíndrico para combinar la potencia de 132 módulos RF en una sola etapa. (izquierda) campo H: acoplamiento magnético homogéneo a 132 bucles de entrada en la pared cilíndrica; (derecha) Campo E: fuerte acoplamiento capacitivo ajustable a la guía de onda de salida.

[Ver todo](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

El acoplamiento βm o d u l e must be the same for all of the input loops. It is easily adjusted by means of the loop size (typically a few square centimetres). The coupling of the output waveguide βwaveguide is mainly determined by the size of the capacitive disc that couples to the electrical field of the E010 resonance. To obtain matched conditions and an optimum combining efficiency for a number n of RF modules, the coupling factors must be set according to:

βwaveguide≈η×βmodule≫1.(18)

View SourceAs shown in Fig. 65, and implemented on the ESRF prototype in Fig. 63, the piston attached to the top of the waveguide can be moved up and down, and the back short-circuit plane can be moved back and forth. This allows adjustment of the coupling factor βmodule in a range of about 1:3, thereby matching the SSA for a variable number of connected modules. The nominal power of the SSA can therefore be easily adapted to changing operating conditions by simply removing a number of RF modules and re-adapting the waveguide coupling accordingly.

Fig. 66 shows the prototype ESRF amplifier with a cavity combiner. The water-cooled ‘wings,’ which support six RF modules each, constitute a section of the cavity wall with built-on coupling loops. The RF modules are therefore directly flanged to the combiner and there is no need for coaxial RF power cables. The RF splitters for the distribution of the RF drive power as well as the DC power distribution are fixed onto the rear sides of the wings. The prototype in Fig. 66, with only three active wings and 19 blind flanges, delivered as much as 12.4 kW of RF power with a DC-to-RF conversion efficiency of 63%.

**Fig. 66.**

Prototype with three wings and a total of 18 700 w RF modules, successfully tested at 12.4 kw with a DC-to-RF efficiency of 63%. (left) cavity combiner with wr2300 output waveguide; (right) direct coupling of RF modules; (bottom) water-cooled wing with six RF amplifier modules.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

The extension of the prototype with a total of 22 active wings is close to completion and will be ready for power tests in 2015. The achievable output power is estimated to be between 80 kW to 90 kW, which is slightly above the power obtained from one ELTA/SOLEIL coaxial tower. At the same time, the cavity combiner is by far more compact than an equivalent coaxial combiner.

#### 5. 5) a Brief Comparison of Klystrons and RF Solid-State Amplifiers

As mentioned in previous sections, klystrons have been the workhorses of accelerators with excellent stability and operation reliability. However, klystrons in general have a number of disadvantages that make them less attractive for certain accelerator applications in comparison to solid-state high-power systems. In the interest of a thorough overview, we will enumerate the pros and cons of solid-state high-power amplifiers as alternatives to klystrons.

#### 6. Pros

* SSAs use low-voltage power supply (50 V) as opposed to klystrons, which require 100 kV.
  + It eliminates X-ray shielding
  + 20 dB less phase noise due to power supply ripples
* High modularity/redundancy providing high operation reliability.
  + SSA is fully operational if few RF modules fail. Except if a driver module fails.
  + Easy maintenance with sufficient components on hand.
* Durability and obsolescence.

As far as using klystrons or other vacuum electron devices, this may not be an issue as long as the device is available on the market. Otherwise, the cost of developing a new device may be prohibitive. For SSAs, even though the power transistors generally have a shorter production lifetime, one can find compatible or better performance replacement power transistors on the market. Nevertheless, it requires that one vigilantly follows the market and adapts appropriately in order to take advantage of the new devices.

#### 7. Cons

One possible disadvantage of SSAs configuration is that it requires an amount of large real estate per kW compared to klystrons. However, a modular configuration allows for the precise match of the power of a solid-state power amplifier to the specified requirements. In addition, with a cavity combining scheme, a substantial size reduction can be obtained, as it is very compact when compared to a coaxial combiner configuration

#### 8. Investment Costs

Although SSAs are presently more expensive (per kW unit) than the vacuum tubes, the technology evolves and with the higher demand for such devices, one expects the overall cost to trend down. On the other hand, the cost of high-power klystrons in the past decade has increased. With the recent SSAs implementation at ESRF (France), there is an expectation of significant cost reduction for possible mass production of fully planar RF modules developed. In addition, utilizing streamlined and efficient power combining using cavity combiners would reduce the fabrication costs compared to fabrication of large and bulky coaxial-type power combiners.

Since the failure rates associated with SSA modules is low (∼0.7% per year) and the repair costs are inexpensive, the cost of maintaining an adequate supply of spare units is affordable. It is substantially lower than the cost of repaired or spare klystrons.

The question of selecting the best technology for high RF power for accelerator projects is a “hot topic” discussed in RF workshops and conferences. Yet, more and more laboratories are considering SSAs as an adequate solution for their RF needs. For the time being, it is believed that for multi-megawatt applications, klystrons have distinct advantages. However, for accelerator applications of several hundreds of kilowatts, in particular for medium-sized projects with limited resources and funds, solid-state amplifiers will become more and more attractive.

### F. Outlook

RF power generation is one of the key factors to assure the achievement of the target specifications and reliability goals for a particle accelerator, as well as one of the major capital costs for a facility in terms of construction, operation, and maintenance. Therefore, besides the requirements on power level and frequency, the choice of the technology should also consider other factors such as efficiency, gain, costs, relative ease of installation, operational flexibility, and maintenance. While large projects can include specific R&D programs on RF power generation to optimize the choice to their needs, smaller accelerators could not afford this and therefore opt to benefit from the use of state-of-the-art technologies—often turn-key system derived from industrial applications like broadcasting.

For frequencies below 1.3 GHz, a tendency to use modular and compact RF power sources, like solid-state based amplifiers and combining IOTs, has arisen in the last decade [231]. This is particularly the case of users’ facilities where high reliability is required given the reduced manpower. Tetrodes (up to 400 MHz) and klystrons are still a well-known, attractive, reliable and established choice, however.

For very high power in the multi MW range and for frequency above 1.3 GHz, klystrons remain the unique option. This is the case of pulsed systems, for example. As a matter of fact, combining a large number of smaller sources, even if available at the working frequency, poses increased criticalities in terms of complexity and operability.

Solid-state amplifiers built combining hundreds of modules have demonstrated that they are competitive with vacuum tubes in the frequency range up to 1.3 GHz and up to a few hundreds of kW cw. The high modularity and the absence of high voltage make them easy to operate and maintain. Industrialization of these solutions is now a reality. Due to the fast growing semiconductor industry, strategies for long-term maintenance and serviceability should be considered from the design phase to cope with possible obsolescence. New developments in semiconductors, like GaN transistors, could extend power levels, frequencies and efficiency. New combination schemes could also lead to more compact systems.

IOT based transmitters have been selected for many projects. Often two to four tubes are combined to reach the hundreds of kW. High efficiency and modularity, achieved using combiners able to allow operation if one tube fails, are important aspects of these schemes. The development of the ESS multi-beam IOTs could lead to reaching higher power with a single tube. Future accelerators, e.g., FCC and ILC, are expected to have increasingly stringent requirements on energy usage, space, and reliability, and may require yet more innovative designs to further increase amplifier efficiency. It is also hoped that the development may open up the possibility of improved efficiency for light sources as the multi-beam design lends itself to scaling to different frequencies and power levels.

**SECTION X.**

## **Progress in Low-Level RF**

Low Level RF (LLRF) Control is the general term given to the group of systems that allows settings and regulation of the RF fields in accelerating structures. The earliest accelerators and single accelerating structures today require only amplitude and frequency control to operate, allowing for relatively simple control systems. For example, Lawrence and Livingston's first cyclotron structure was actually part of the tuned oscillator circuit and had no external controller [232]. Since these early machines, progress in Low Level RF control has been a combination of increasing requirements from the accelerator designers and increasing technical capability, with the biggest technical advancements coming from the transition from analog to digital signal processing. Today's multi-cavity linacs and synchrotrons require precise phase and amplitude control of cavity RF fields with complex control algorithms and may also require a variety of beam instrumentation for energy feedback and beam loading compensation. The interaction of beam with RF systems has been the topic of many academic studies. [233]. Starting in the mid 1970's, a control scheme using analytic signals was developed by scientists and engineers at LANL/CERN/ANL (Jachim/Boussard/Delayen) [234]. By replacing the traditional amplitude and phase control parameters with the orthogonal real (I) and imaginary (Q) components of the RF vector, the AM/PM cross coupling of the control loops is eliminated. A side benefit of this IQ control scheme is that it is a perfect fit for digital signal processing. See Fig. 67.

**Fig. 67.**

Modern “iq” control loop architecture.

[View All](https://ieeexplore.ieee.org/document/7323878/all-figures)

Some early hybrid analog/digital control systems using microprocessors appeared in the late 1970's, [235] but it took highly optimized Digital Signal Processors (DSPs) made available in the mid 1990's to develop more wideband systems used in LLRF systems at DESY for the Tesla Test Facility (TTF) [236] and at Fermilab for the Main Ring and Tevatron synchrotrons [237]. The major advancement for LLRF systems came in the early 2000's with the implementation of complex Field Programmable Gate Arrays (FPGA) such as the Spallation Neutron Source (SNS) LLRF systems implemented by a team led by the Lawrence Berkeley National Laboratory [238]. The FPGA allows parallel processing producing a significant reduction in internal delay. A side benefit of these systems is that the digital signals present throughout the controller signal chain are easily passed through the accelerator control system to remote displays and other analysis applications.

As LLRF performance increases, beam parameters improved as well, particularly with the synchrotron light sources and Free Electron Lasers (FELS). Arrival-time jitter of <60 fs has been reported at FLASH [239] and is the goal of machines in construction or development, such as XFEL and LCLS-II [240] and [241]. This level of beam stability is the culmination of many years of development work, along with the flexibility of digital systems to allow for implementation of complex architectures including real-time beam based feedback and learning feed-forward systems. Recent advancements in the signal fidelity of the process chain is the other half of the performance story.

While the digital circuits provide almost noiseless signal processing, there are still analog components that limit dynamic range and stability, and often introduce error sources themselves. The most sensitive components are the analog down converts constructed with frequency mixers and the Analog to Digital Converters (ADCs) that digitize the Intermediate Frequency (IF) generated by the down-converters. While the performance of mixers and other RF components continue to improve, the big gains in noise performance and linearity have come from the high speed ADCs developed for the telecom industry. A high end ADC such as the LTC2107 from Linear Technology, provides 16-bit at 210 Msps with a 98 dB full scale spurious free dynamic range, and a performance rivaling quality analog components [242]. FPGAs continue to make rapid progress in computing power still following Moore's law. For instance, a Virtex UltraScale+ is capable of a staggering 21,000 Giga Multiply-Accumulate Operations per second (GMACs) [243]. The latest devices from multiple vendors now contain hard core processors which allow for not only LLRF, but a complete accelerator control system interface on a single device as well. High-speed communication protocols such as PCIe provide seamless real-time communication across multiple modules and distributed crates.

FPGAs have allowed for the development of other RF control schemes that allow for different modes of operation of the RF amplifiers to control the output power. These include: amplifier linearization that increases the usable range of klystrons, class S modulation allowing high efficiency solid-state amplifiers, Fast Ferrite Vector Modulators [244], and a phase modulation scheme for controlling magnetrons [212].

The path of LLRF system development over the past 50 years tracks closely with the cutting edge developments in telecommunications, including the current rapid development of digital radio systems. Digital radio technology has allowed for a large jump in precision, stability, and complexity of algorithms for our next generation of accelerators.

### A. Outlook

LLRF systems in the future will likely diverge into lower cost commercial systems that will be turnkey in operation, and high-end systems that will see increased integration with RF power sources and beam instrumentation to form complex multi-input, multi-output controllers. Neural net controllers will optimize RF and beam control at the operations level, greatly reducing laborious machine tuning by hand while increasing machine stability.

**SECTION XI.**

## **Future Developments and Major Challenges**

The growing demands from the users of accelerators in the next decades and beyond would drive the advancement of accelerator and RF technology beyond what is currently considered state-of-the art. In this section we will give our assessment of future advancements and development in RF accelerators that are needed to support of next generations of accelerators as well as commercial systems for industrial and medical applications. The major challenges facing the accelerator designers will be high performance accelerators with emphasis on smaller RF system footprints and reduced capital and operation costs. As far as accelerating structures, we expect significant R&D to take place focused on understanding the fundamental and underlying physics of the surface of the material and the bulk properties to push the accelerating gradient in both normal and superconducting structures beyond the current limits, which would allow breakdown-free reliable operation. For the normal conducting machines, the trend will continue towards the use of high frequencies for high-accelerating gradient at C-, X-band. Understanding of surface breakdown mechanisms in normal conducting structures (copper) due to pulsed heating and field emission are keys to pushing accelerating gradients of high-frequency, high-gradient RF structures for any future large accelerator facility such as the CERN CLIC project [245].

In terms of achieving higher accelerating gradient in X-band and higher-frequency room-temperature structures, the major hurdles to overcome include: controlling RF breakdown damage which is proportional to the input power, pulse length, and group velocity. Thus, RF efficiency optimization must be based on shorter accelerator length, higher phase advance, and lower group velocity. To obtain high-quality surface finishing, it will be prudent to apply similar preparation and cleaning process practices employed in superconducting RF to room temperature accelerator structures to achieve optimal performance. Pursuing other suitable room-temperature materials for higher frequency accelerating structures could meet the demand of higher accelerating gradients in terms of shorter accelerator length and power consumption. Continued R&D using molybdenum (Mo) as a thin film on copper (Cu) could result in low breakdowns at high RF power [Mo]. Initial investigation of Mo thin film on copper showed promising results compared with bulk copper. Sputtering of Mo on Cu seems to be a promising approach to increase the accelerating gradient of accelerating structures operating at higher frequencies.

Otros enfoques viables, como las estructuras dieléctricas o híbridas cargadas dieléctricas [246] (dieléctrico y cobre) podrían presentar un camino hacia un gradiente de aceleración más alto a altas frecuencias al superar el límite teórico del campo eléctrico de la superficie del pico a la relación del campo de aceleración axial. Este enfoque presenta algunos problemas fundamentales, como la descomposición dieléctrica, el calentamiento de Joule, la supresión multipactor y las propiedades de vacío, que deben investigarse para determinar si estas estructuras podrían ser alternativas a las futuras estructuras de linac.

Las cavidades de RF superconductoras han sido la opción tecnológica para muchas instalaciones de aceleradores. Estas cavidades están hechas de niobio, formado a partir de láminas a granel o pulverizadas en películas sobre cobre. Hoy en día, los métodos de producción de última generación producen cavidades que se aproximan a los límites fundamentales del niobio con una resistencia superficial muy cercana al valor ideal de BCS a las temperaturas de funcionamiento que sostienen los campos electromagnéticos cerca del campo de sobrecalentamiento del material. La creciente demanda de futuros aceleradores impulsados ​​por las ciencias requerirá explorar enfoques alternativos a SRF para aplicaciones de aceleradores. Se necesita investigación de SRF con I + D enfocada sustancial para desarrollar materiales alternativos para alcanzar límites fundamentales más altos que el niobio [247]. Se necesita investigación y desarrollo a largo plazo para estudiar e investigar todo el potencial de materiales alternativos comoN b3S n, MgB2 y NbN para fabricar cavidades con una mejor eficiencia criogénica y poder alcanzar gradientes de aceleración más altos para que se necesiten menos cavidades para una energía de haz dada.

Junto con el desarrollo de materiales alternativos adecuados, es esencial continuar con la I + D explorando diferentes tratamientos de química superficial de las cavidades de niobio para lograr y mantener consistentemente factores de alta calidad superficial de las cavidades de niobio que son de gran importancia para que los aceleradores en modo CW sean rentables. La reciente I + D propuesta [247] sobre el dopaje con nitrógeno de las cavidades de niobio produjo resultados muy prometedores de lograr altos valores de Q de las cavidades de aceleración de niobio de banda L de una o varias celdas en configuraciones de criostato tanto verticales como horizontales. Mantener un valor Q muy alto de las cavidades de celdas múltiples ensambladas en un criomódulo en la operación de ruta es un desafío técnico importante que necesita más investigación y desarrollo en materiales de dopaje y optimización del proceso de dopaje.

Un cambio de paradigma en la eficiencia energética presenta un nuevo desafío para el diseño, la configuración y la distribución de fuentes de RF de alta potencia a las instalaciones de acelerador existentes y futuras como CLIC, ILC, ESS y FCC. El objetivo principal es lograr una mayor eficiencia energética al reducir el consumo de electricidad. Creemos que la I + D en el área de los nuevos sistemas de RF de alta potencia es crucial para futuras instalaciones de aceleradores. Los tubos de electrones comerciales de alta potencia de hoy en día utilizados por muchas instalaciones de aceleradores en todo el mundo no pueden satisfacer las demandas de mayor eficiencia energética de los aceleradores futuros. La eficiencia energética limitada (p. Ej., Rango del 50%) sería aceptable para grandes instalaciones de aceleradores. Hay muy pocos tubos de vacío comerciales (klystrons) disponibles actualmente en el mercado que sean capaces de operar con un 65% de eficiencia o más. Hasta hace poco no estaba claro que proporcionar una mayor eficiencia es un parámetro clave de rendimiento, mientras que en el pasado, el énfasis estaba en lograr la potencia de RF máxima (promedio) más alta. Por lo tanto, existe una clara necesidad de invertir en nuevas tecnologías para alcanzar este objetivo. Creemos que un enfoque de dos puntas pondría este desarrollo en el camino correcto. Explorar nuevas ideas para enfrentar el desafío de la eficiencia energética con los objetivos de reducir el consumo de electricidad, y la recuperación y reutilización del calor desperdiciado son fundamentales para las próximas décadas y más allá. Creemos que un enfoque de dos puntas pondría este desarrollo en el camino correcto. Explorar nuevas ideas para enfrentar el desafío de la eficiencia energética con los objetivos de reducir el consumo de electricidad, y la recuperación y reutilización del calor desperdiciado son fundamentales para las próximas décadas y más allá. Creemos que un enfoque de dos puntas pondría este desarrollo en el camino correcto. Explorar nuevas ideas para enfrentar el desafío de la eficiencia energética con los objetivos de reducir el consumo de electricidad, y la recuperación y reutilización del calor desperdiciado son fundamentales para las próximas décadas y más allá.

Como ejemplo de los dispositivos de vanguardia actuales, los klystrones MBK de 10 MW en banda L para el Colisionador Lineal Internacional (ILC) están cerca de ser 70% eficientes. Estudios recientes han demostrado que ampliar la tecnología actual podría proporcionar un MBK klystron comercial de banda L de 20 MW con una eficiencia superior al 70%, que cumple con los requisitos de diseño de CLIC. Es un objetivo realista desarrollar un klystron con una eficiencia de producción de potencia de RF del 90% o más. Esto es posible a través de una mejor comprensión de la física de klystron y el uso de los recursos de computación modernos disponibles para el modelado y análisis de precisión detallados.

Recent advancements in semiconductor and transistor technology made it possible to develop RF power systems adopting solid-state RF power devices to replace traditional vacuum amplifier systems. Solid-state amplifiers offer major advances over traditional vacuum design:

* They operate at much lower power supply voltages.
* The operating efficiency of solid-state RF amplifiers will exceed that of vacuum tube-based systems, particularly at low to medium RF power levels where overall reliability is enhanced.
* The expected useable lifetime of solid-state components far exceeds that of vacuum tubes.
* A solid-state RF system could provide “cleaner” RF power, with reduced phase and amplitude noise distortion.

These advantages have made solid-state RF systems an attractive alternative to vacuum tube devices, particularly since the cost and availability issues associated with vacuum tubes for major high-energy accelerator facilities have become crucial issues in recent years. The development of laterally-diffused metal oxide semiconductor (LDMOS) field effect transistor devices, and more recently, gallium nitride (GaN) devices capable of ∼1000 watts continuous wave output power per device, has further propelled the advancement of solid-state technology in new and existing accelerator RF systems. The higher power output per device reduces combining losses to improve efficiency, and helps to keep the overall size of solid-state RF systems reasonable. Due to space constraints imposed by existing building infrastructures, minimizing the size of large solid-state RF power systems is a critical requirement to consider when applying this technology in existing facilities as well as accelerators under construction.

**SECTION XII.**

## **Conclusion**

La radiofrecuencia ha realizado contribuciones significativas y oportunas a la evolución de los aceleradores de partículas desde principios de la década de 1920, y continúa siendo una tecnología esencial para el desarrollo de nuevos y novedosos aceleradores de partículas para física de alta energía, fuentes de luz sincrotrón, física nuclear, neutrones fuentes, plasmas láser y medicina e industria para el siglo XXI y más allá. Nuestro objetivo aquí era dar a los lectores una descripción histórica de la evolución de los sistemas de RF para aceleradores de partículas. La transición de DC a la aceleración del haz de RF desencadenó el inicio de una nueva era de desarrollo de sistemas de RF de alta frecuencia y alta potencia para aceleradores de partículas.

Después de la Segunda Guerra Mundial, el avance constante en la tecnología de RF permitió el desarrollo de sistemas de mayor frecuencia y mayor potencia en apoyo de numerosas instalaciones de aceleradores importantes construidas en las últimas décadas, incluido el sincrotrón de protones GeV 28 CERN, el sincrotrón de gradiente alterno Brookhaven 33 GeV, SLAC dos- milla de largo 18.4 colisionador lineal GeV, colisionador DESY PETRA 22-GeV, colisionador de hadrones grandes CERN (LHC), colisionador de protones-antiprotón Fermilab Tevatron, colisionador de iones pesados ​​relativistas (RHIC) en Brookhaven, instalación de acelerador continuo de haces de electrones (CEBAF) en Jefferson Laboratorio nacional, y varias fuentes de luz de anillo de almacenamiento de tercera generación.

Las demandas de eficiencia energética, compacidad de configuración, confiabilidad del sistema y costo impuestos por la nueva generación de aceleradores actualmente en construcción y aquellos planeados para el futuro han desencadenado el desarrollo de nuevos sistemas de RF de alta potencia como Multi-Beam Klystron (MBK), Hoja -Beam Klystron (SBK), tubo de salida inductivo multihaz (MB-IOT) y amplificador de estado sólido. Aunque las industrias han dado pasos significativos para producir dispositivos comerciales adecuados para aplicaciones de acelerador, la investigación y el desarrollo de sistemas de RF de alta potencia altamente eficientes y rentables sigue siendo un desafío importante para satisfacer las demandas de rendimiento de los futuros aceleradores.