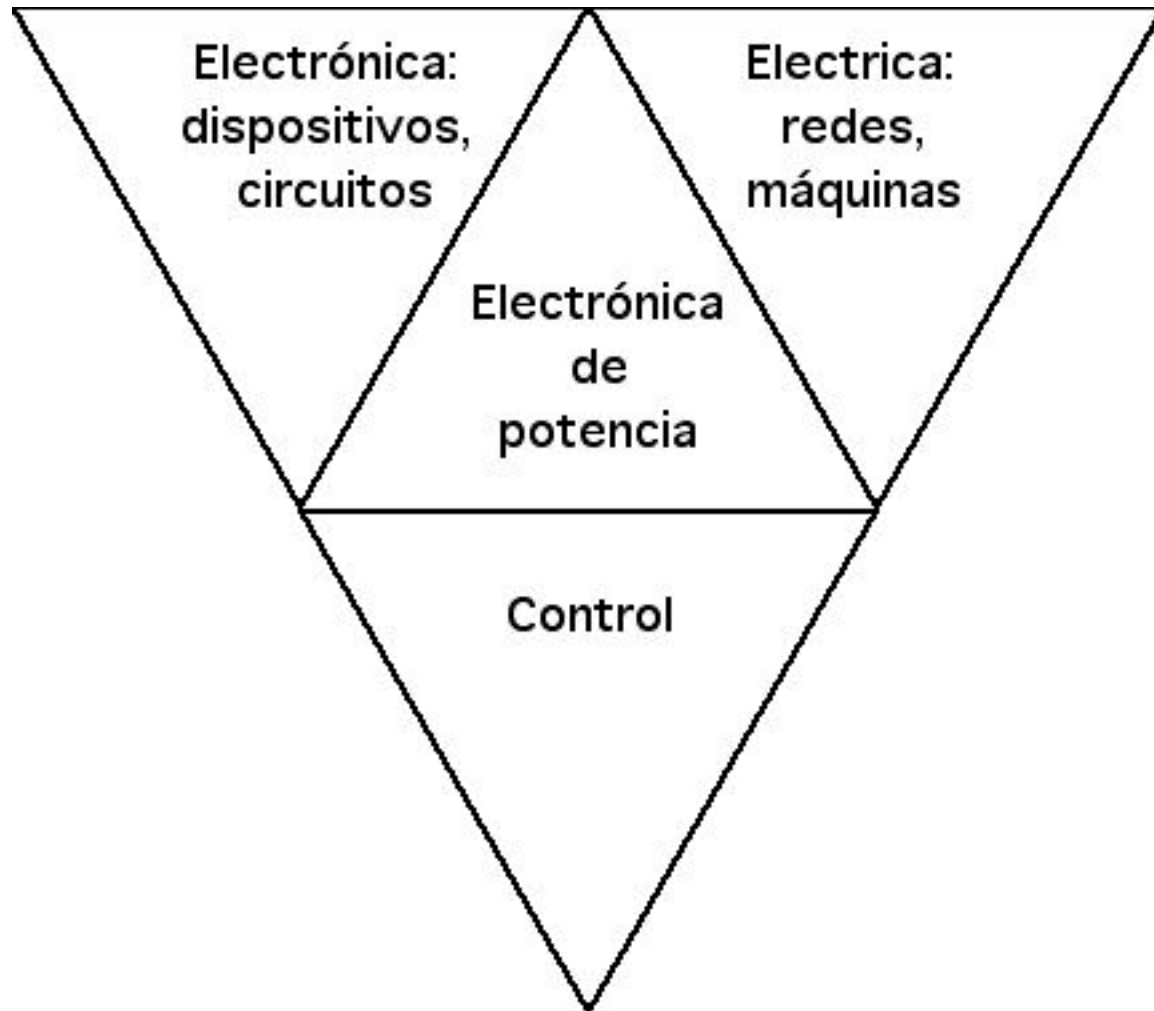


## Electrónica de potencia (a modo de definición)

La electrónica de potencia es la rama de la electrotecnia que se encarga del estudio de los circuitos electrónicos utilizados para modificar el flujo de la energía eléctrica de un sistema proveedor de energía (la fuente) a un consumidor de energía (la carga), usando dispositivos de estado sólido.

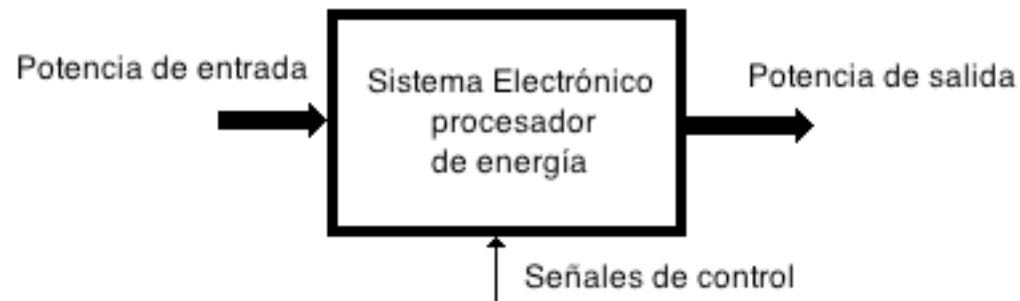
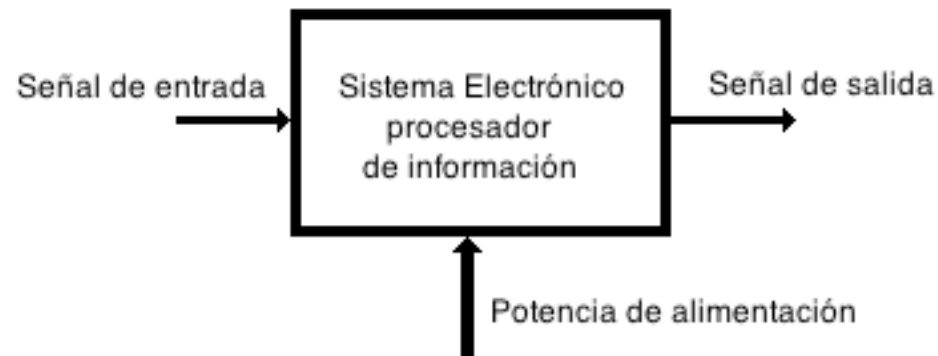
La acción de los circuitos electrónicos de potencia modifica las variables características de la energía eléctrica disponible en el sistema proveedor de energía, para adecuarla a los requerimientos del sistema consumidor que empleará la energía así manipulada para lograr un fin ulterior.

En general, el diseño de un sistema electrónico de potencia requiere del uso de herramientas desarrolladas en tres áreas tecnológicas afines: ingeniería electrónica (dispositivos, circuitos), ingeniería eléctrica (máquinas, redes) e ingeniería de control (algoritmos, técnicas de análisis).



Relación entre el área de competencias de la Electrónica de Potencia y las áreas básicas de dispositivos, máquinas eléctricas y control

El énfasis en la energía de la señal eléctrica manipulada, y no en el contenido de información de la misma es lo que diferencia a los circuitos electrónicos de potencia de los demás circuitos electrónicos, en los cuales el interés fundamental se centra en manipular el contenido de información de la señal eléctrica.



Comparación entre un Sistema Electrónico procesador de información y un Sistema Electrónico de Potencia, procesador de energía.

En una señal eléctrica genérica, las variables modificables por el Sistema Electrónico de Potencia son:

Tipo (AC ó DC)

Voltaje

Corriente

Potencia Activa

Potencia Reactiva

Frecuencia

Relación de fase

Número de fases

Contenido armónico

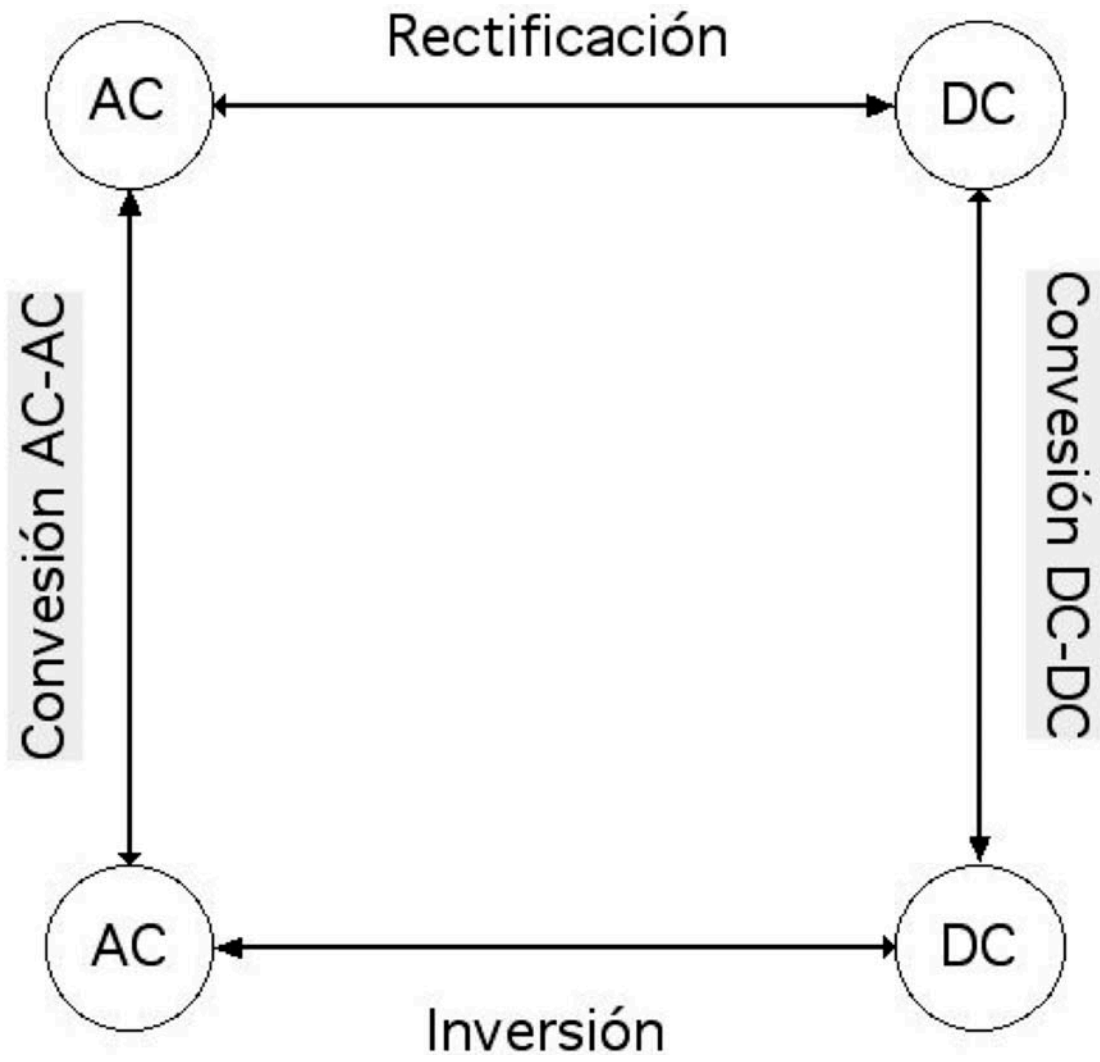
Usualmente, desde el punto de vista de clasificación, se considera que la variable de mayor importancia es el “tipo” de energía eléctrica (AC ó DC) presente a la entrada y a la salida del sistema conversor, lo que da origen a las siguientes transformaciones posibles:

Conversión AC-DC (o rectificación).

Conversión DC-AC (o inversión).

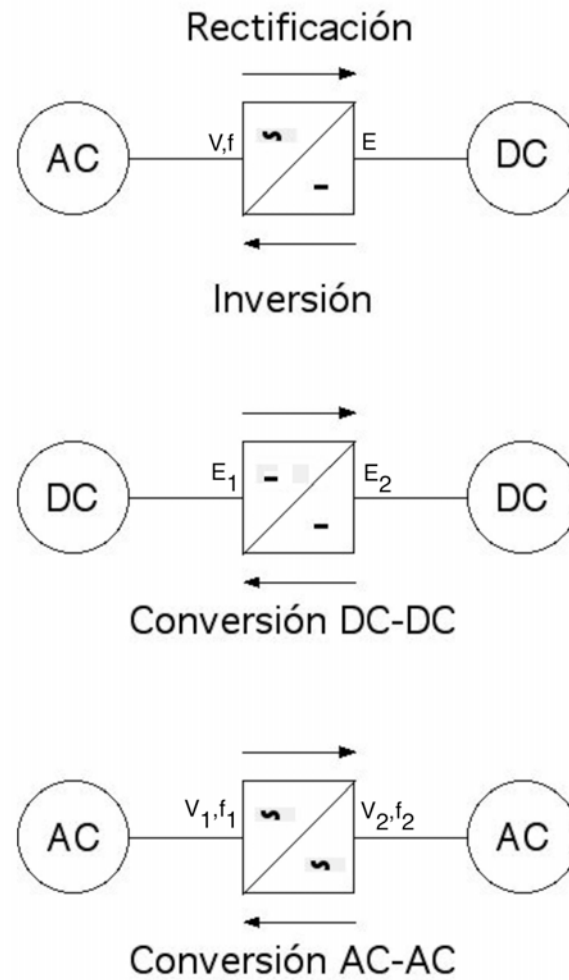
Conversión DC-DC

Conversión AC-AC



Cuadro de las conversiones posibles.





Representación usual en bloques funcionales de las transformaciones posibles.

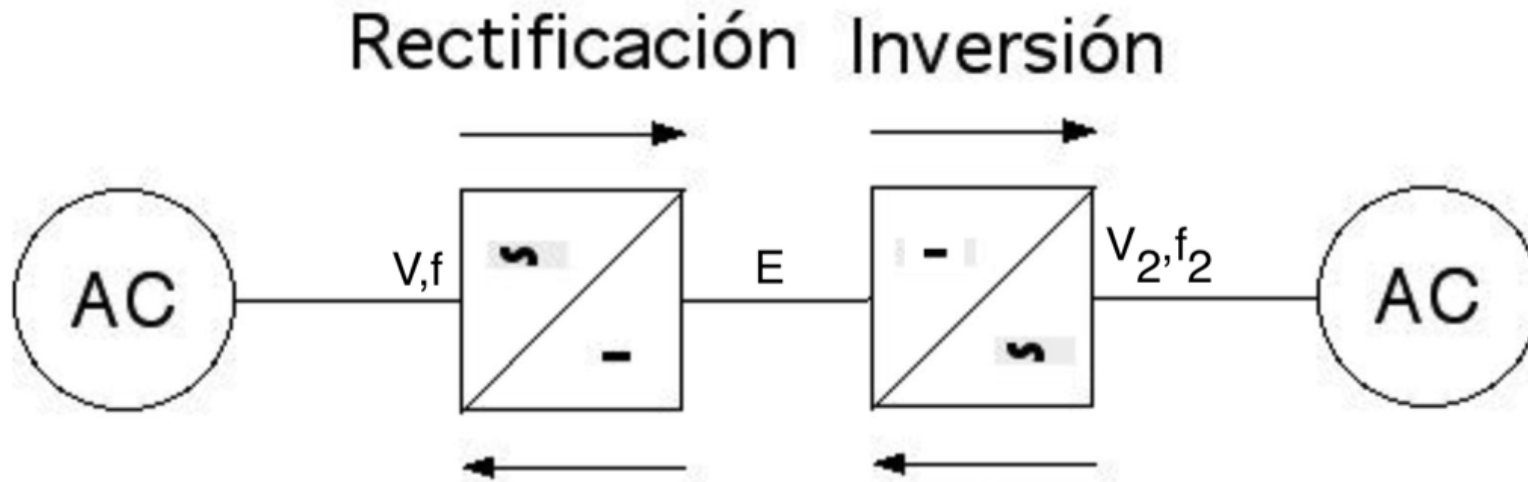
En la mayoría de los casos estas conversiones son directamente reversibles, esto es, la misma configuración circuital puede ser usada para la conversión directa y la inversa.

Por convención se asume que el puerto de entrada es el situado a la izquierda del dibujo y el de salida es el situado a la derecha.

Si la energía fluye siempre del puerto de entrada al de salida, la conversión es unidireccional.

Si la energía puede fluir en ambas direcciones el conversor es bidireccional. En este caso la distinción entre el puerto de entrada y el de salida es arbitraria.

Aunque la conversión directa a AC/AC es posible, existen limitaciones técnicas que en la mayoría de los casos fuerzan a realizar una conversión en dos pasos "en cascada", primero rectificación AC/DC y a continuación inversión DC/AC.



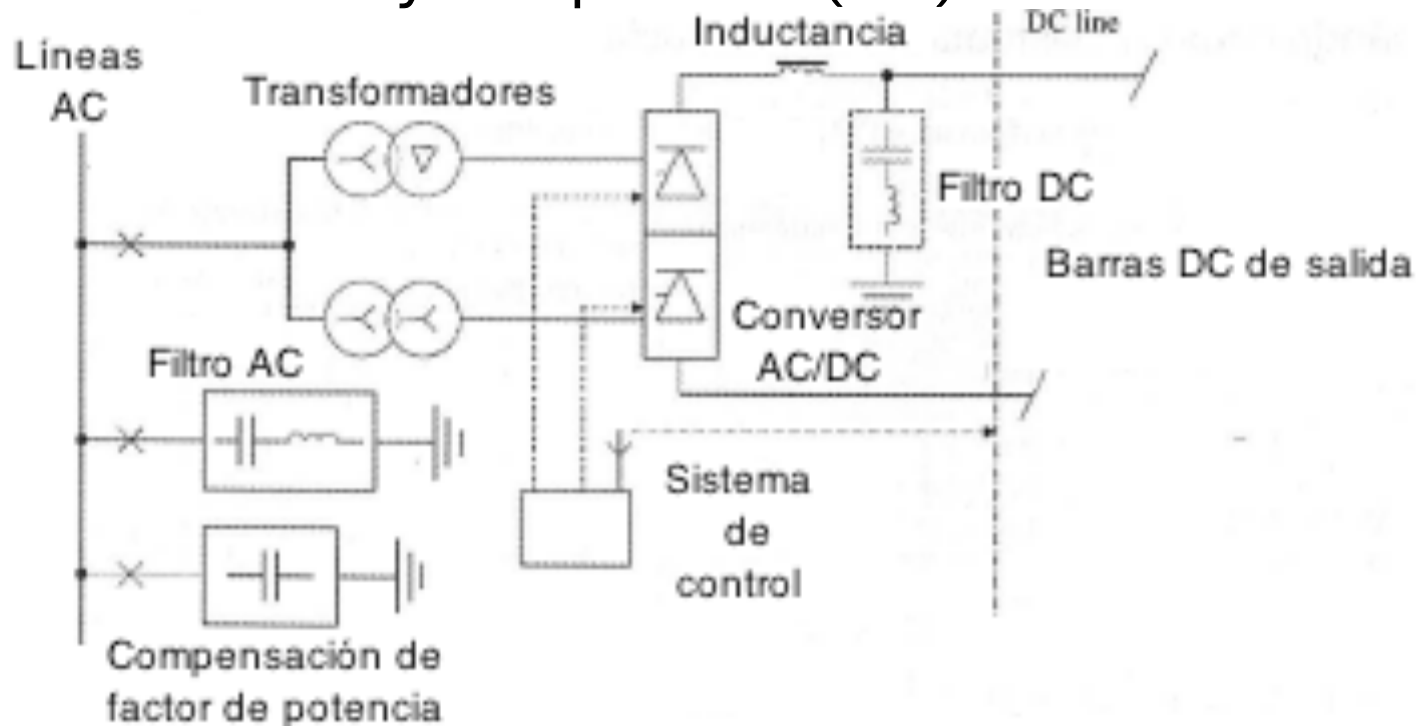
Inversión    Rectificación

Conversiones AC-DC-AC en cascada.

EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LAS DISTINTAS CONVERSIONES.

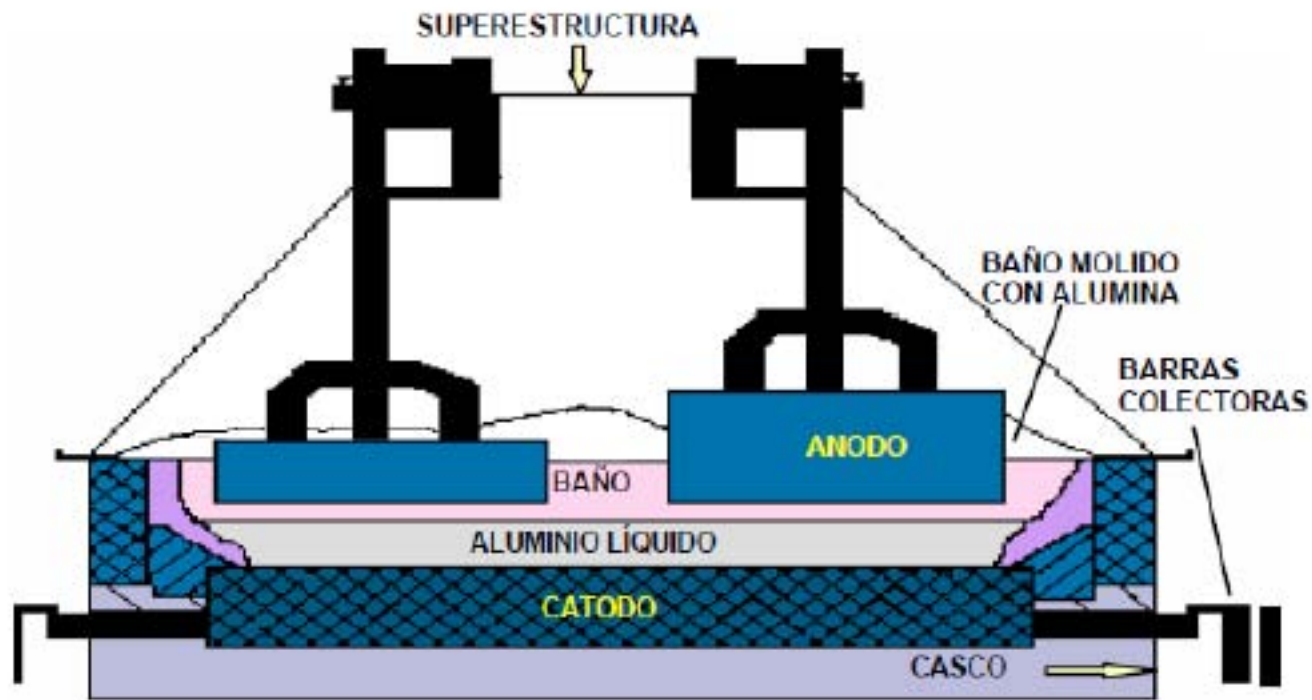
## I- Conversión AC-DC (rectificación).

Transmisión de energía DC en alto voltaje (HVDC: High Voltage DC): muy alta tensión (400kV a 1MV+), alta corriente (kA), muy alta potencia (GW).



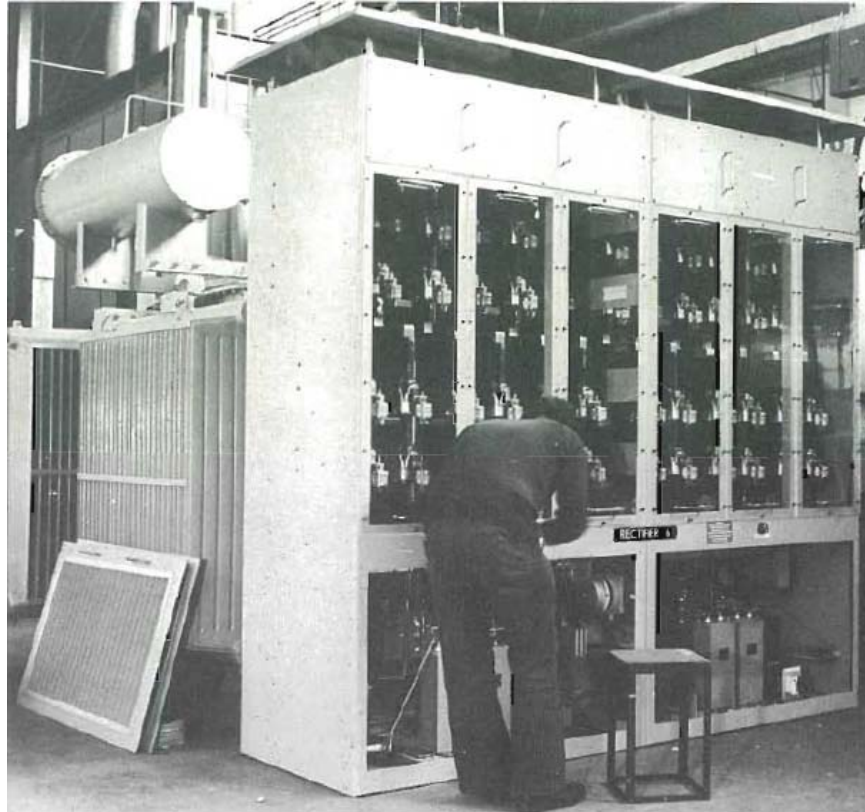
Esquema en bloques (parcial) de una estación HVDC.

Electroquímica: alta corriente (kA+), baja tensión (V), alta potencia (MW+).



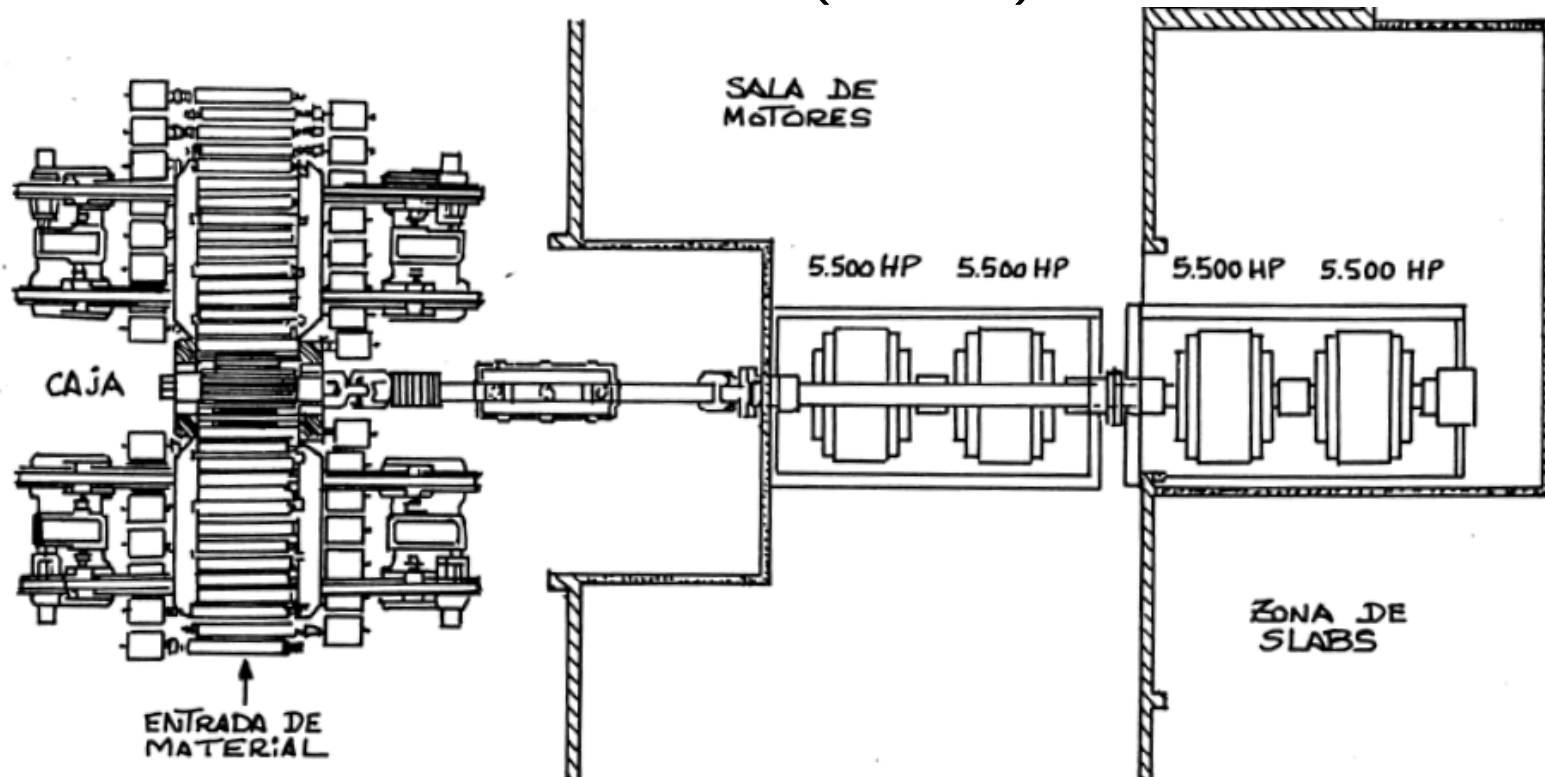
Corte esquemático de una celda de reducción de alúmina, 320kA (VENALUM).

**Sistemas de alimentación de redes de tránsito urbano:  
tensiones medias (400 a 1500 V), alta potencia distribuida  
(MW+ en múltiples estaciones).**



**Unidad convertora AC/DC de 1300kW para una subestación de METRO.**

Control de motores DC industriales: amplia gama de potencias (desde fracción de HP hasta kHP), voltajes (decenas V a kV) y corrientes (A a kA).



Conjunto de motores DC de un tren reversible de laminación de acero en caliente 22.000HP de potencia total.



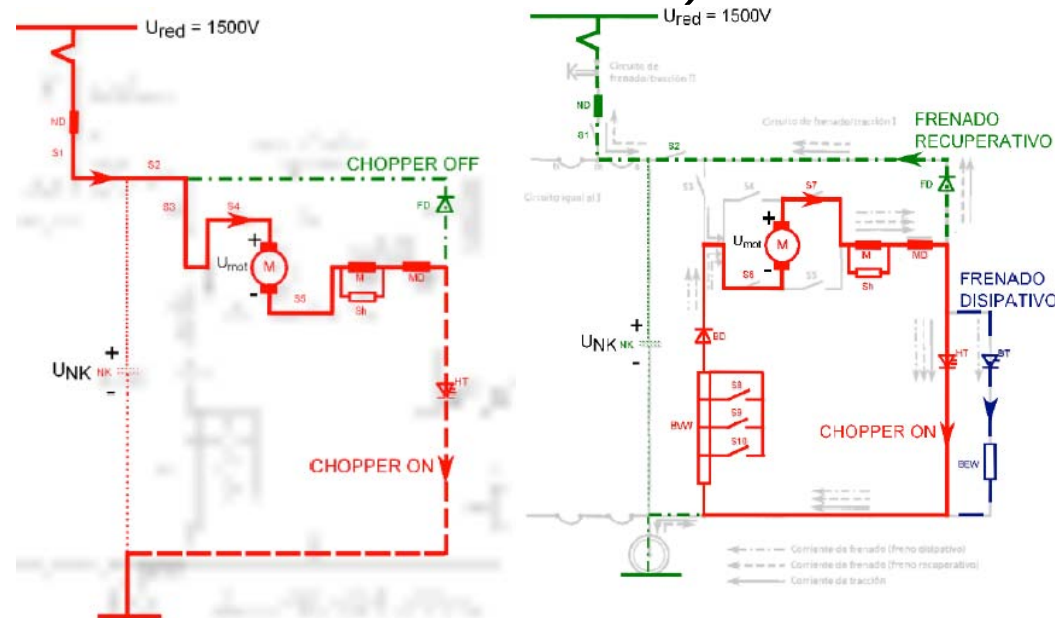
Carga de bancos de baterías: baja tensión (decenas a centenas de V), puede ser alta corriente y alta potencia.



Banco de baterías de un submarino. Potencia pico 500kW

## II- Conversión DC-DC.

Control de motores DC de tracción en redes de tránsito urbano: tensiones medias (400 a 1500 V), potencia media/alta (hasta kHP, posiblemente múltiples ejes motrices con motores individuales).



Sistema de tracción del Metro. Izquierda: modo motor. Derecha; modo freno

**Control de motores DC industriales: potencias bajas/medias(desde fracción de HP hasta decenas HP), voltajes (50 V a centenas V) y corrientes (desde A hasta centenas A).**

**Fuentes de alimentación para aplicaciones electrónicas: potencias bajas/medias(desde fracción de kW hasta decenas kW), voltajes (V a centenas V) y corrientes (desde A hasta centenas A).**

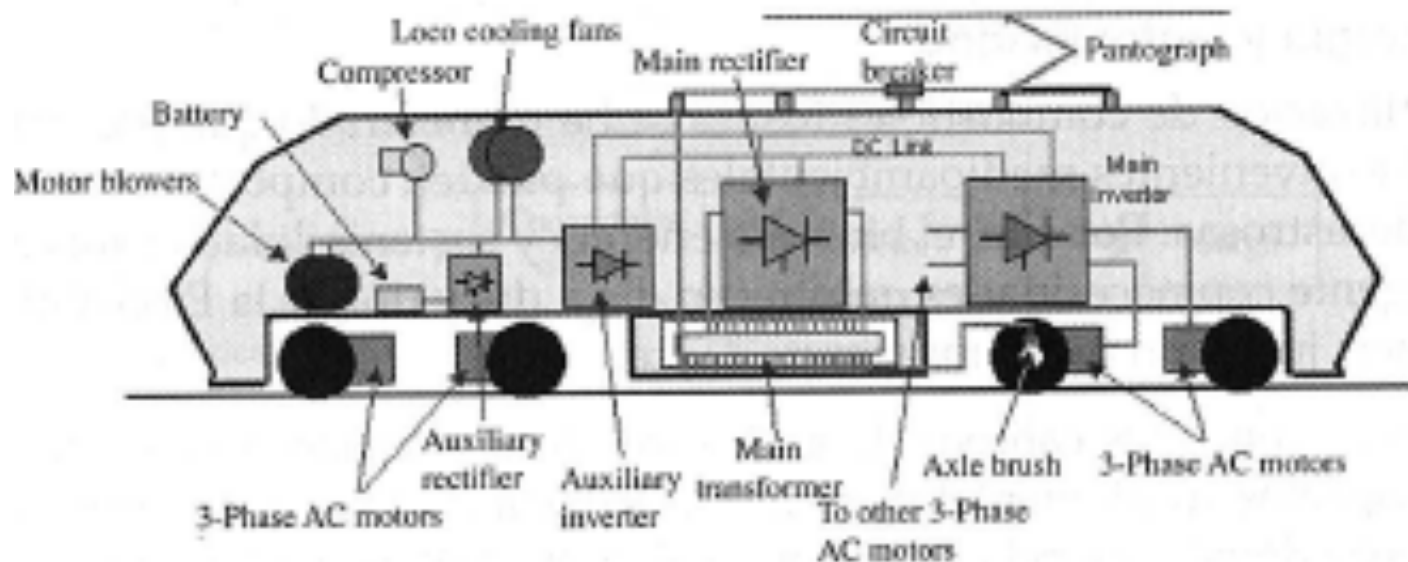
### III-Conversion DC-AC (inversión).

Transmisión de energía DC en alto voltaje (HVDC: High Voltage DC): muy alta tensión (400kV a 1MV+), alta corriente (kA), muy alta potencia (GW).

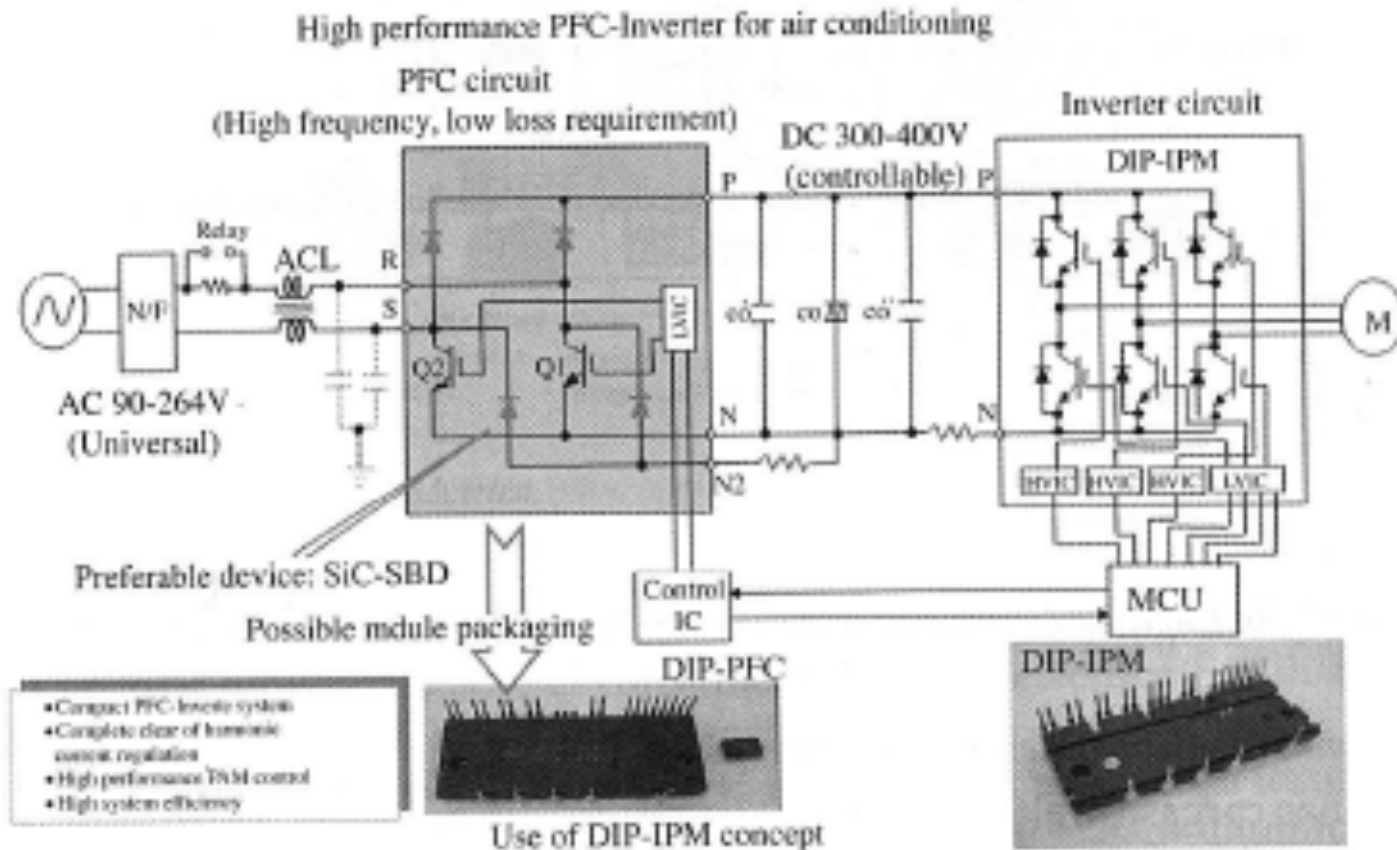


Válvula DC/AC estación HVDC conexión Shin-Shinano (Japón) 300MW, 125kV DC, 1200A DC.

Control de motores AC industriales/domésticos (de inducción, sincrónicos y "brushless DC"): amplia gama de potencias (desde fracción de HP hasta kHP), voltajes (120 Vrms a kV) y corrientes (A a kA).

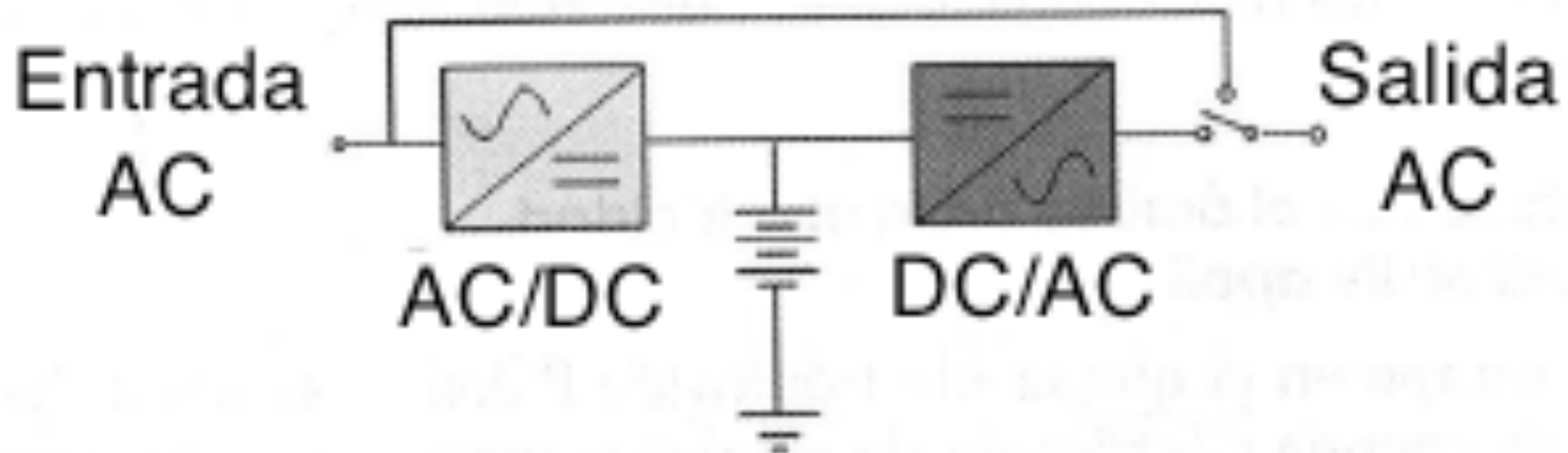


Esquema del sistema de potencia de una locomotora eléctrica moderna.



Esquema de potencia de un aire acondicionado moderno de alta eficiencia energética.

Fuentes de alimentación ininterrumpida (FAI-UPS) para aplicaciones electrónicas: amplia gama de potencias (desde centenares de VA hasta MVA), voltajes (120 V a kV) y corrientes (A a kArms).



Sistemas industriales de calentamiento inductivo o capacitivo: alta frecuencia (kHz a MHz), alta potencia (kW a MW).



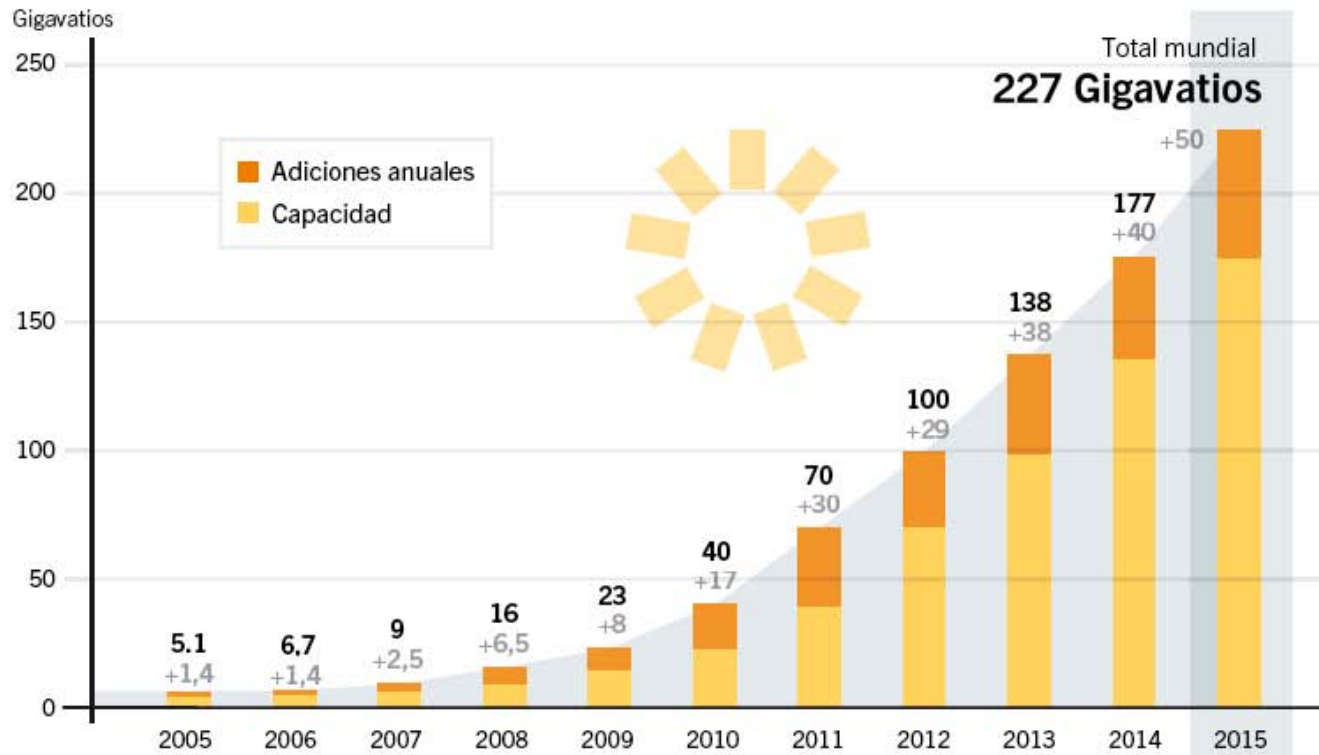


**Sistemas de generación de energías alternativas con salida DC (fotovoltaica y celdas de combustible): potencias bajas/altas (desde fracción de kW hasta decenas MW), voltajes (V a centenas V) y corrientes (desde A hasta miles A).**



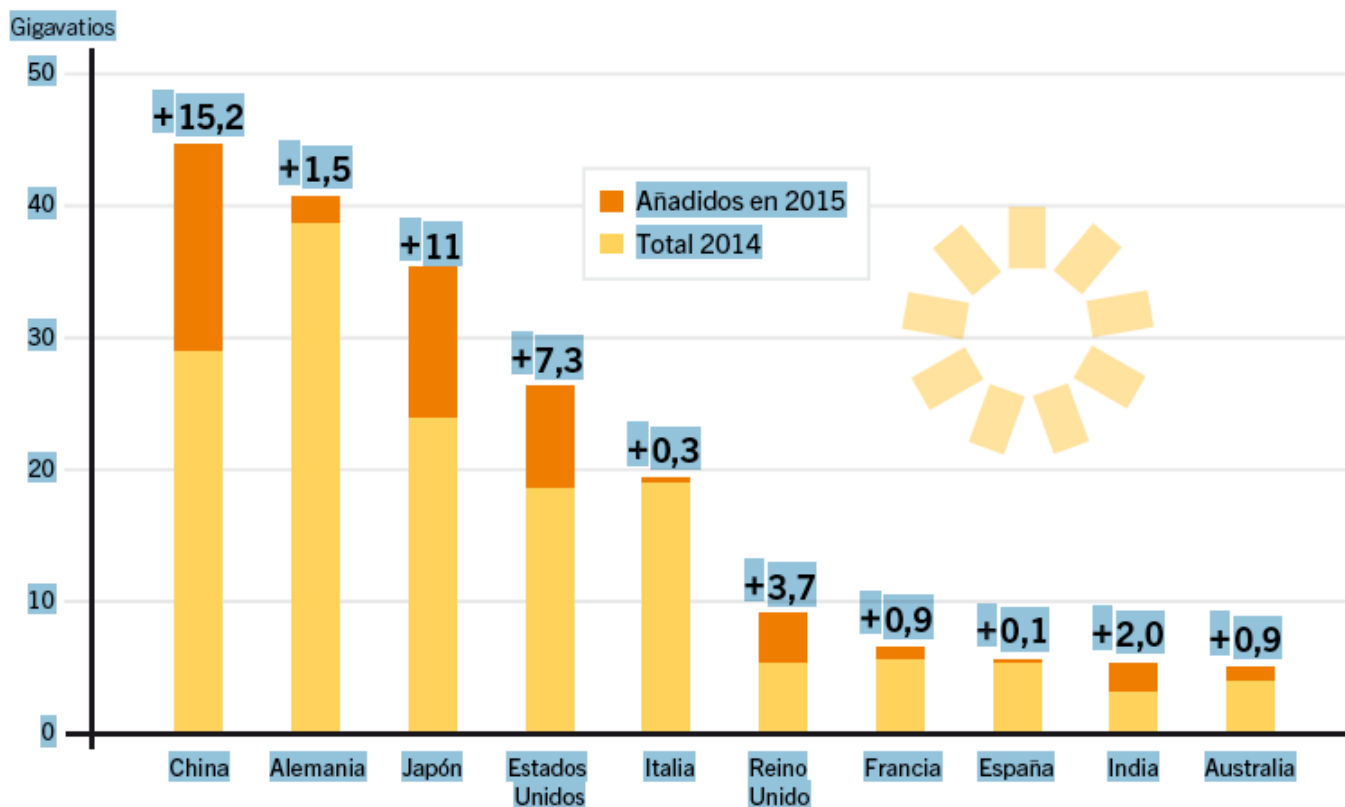
**"Barrio solar" en Friburgo, Alemania.**

## Capacidad y adiciones anuales de energía solar FV, 2005-2015



Tendencia de crecimiento de la capacidad de generación fotovoltaica instalada a nivel mundial.

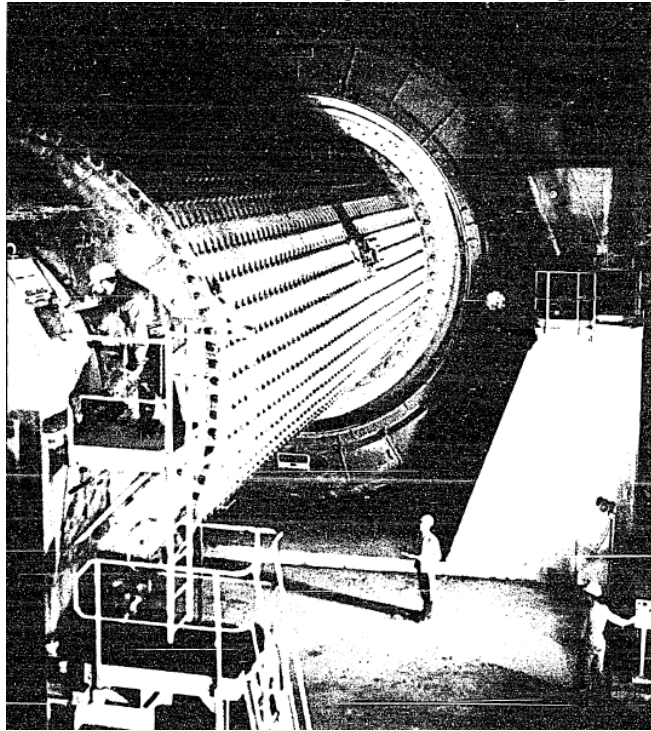
## Capacidad y adiciones de energía solar FV, diez países líderes, 2015



Distribución por países de la capacidad de generación fotovoltaica instalada en 2015

## IVa- Conversión AC-AC con cambio de frecuencia (cicloconversión).

Control de motores AC industriales (de inducción, sincrónicos): muy altas potencias (kHP), voltajes (kV) y corrientes (kA).



Horno rotatorio para producir cemento, motor de 6MW controlado por un cicloconversor.

Sistemas generadores de velocidad variable y frecuencia constante (VSCF): frecuencia de salida fija (50/60 Hz, generadores eólicos; 400 Hz, generadores aeronáuticos), potencia media/alta (kW a MW).

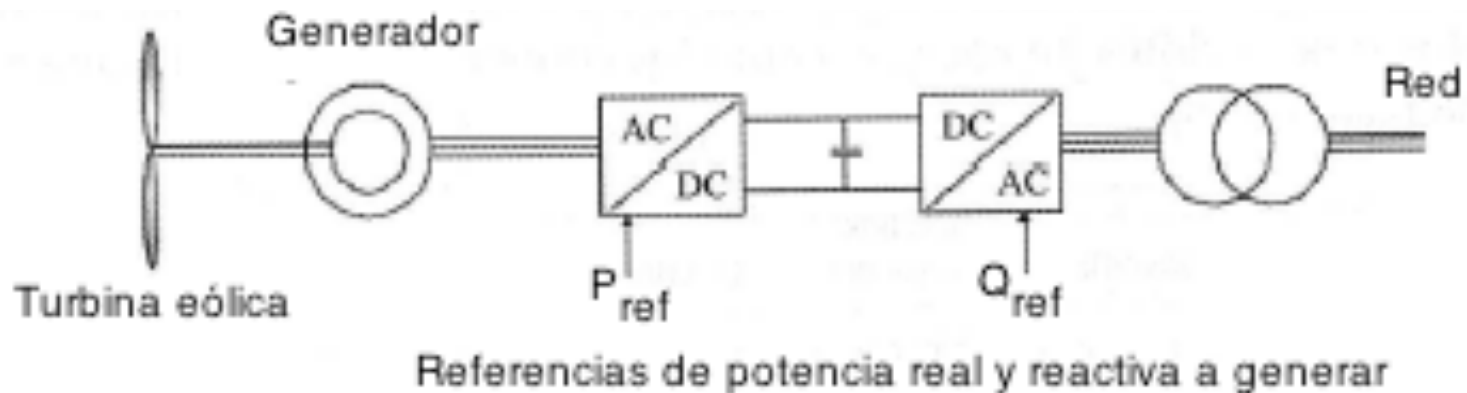
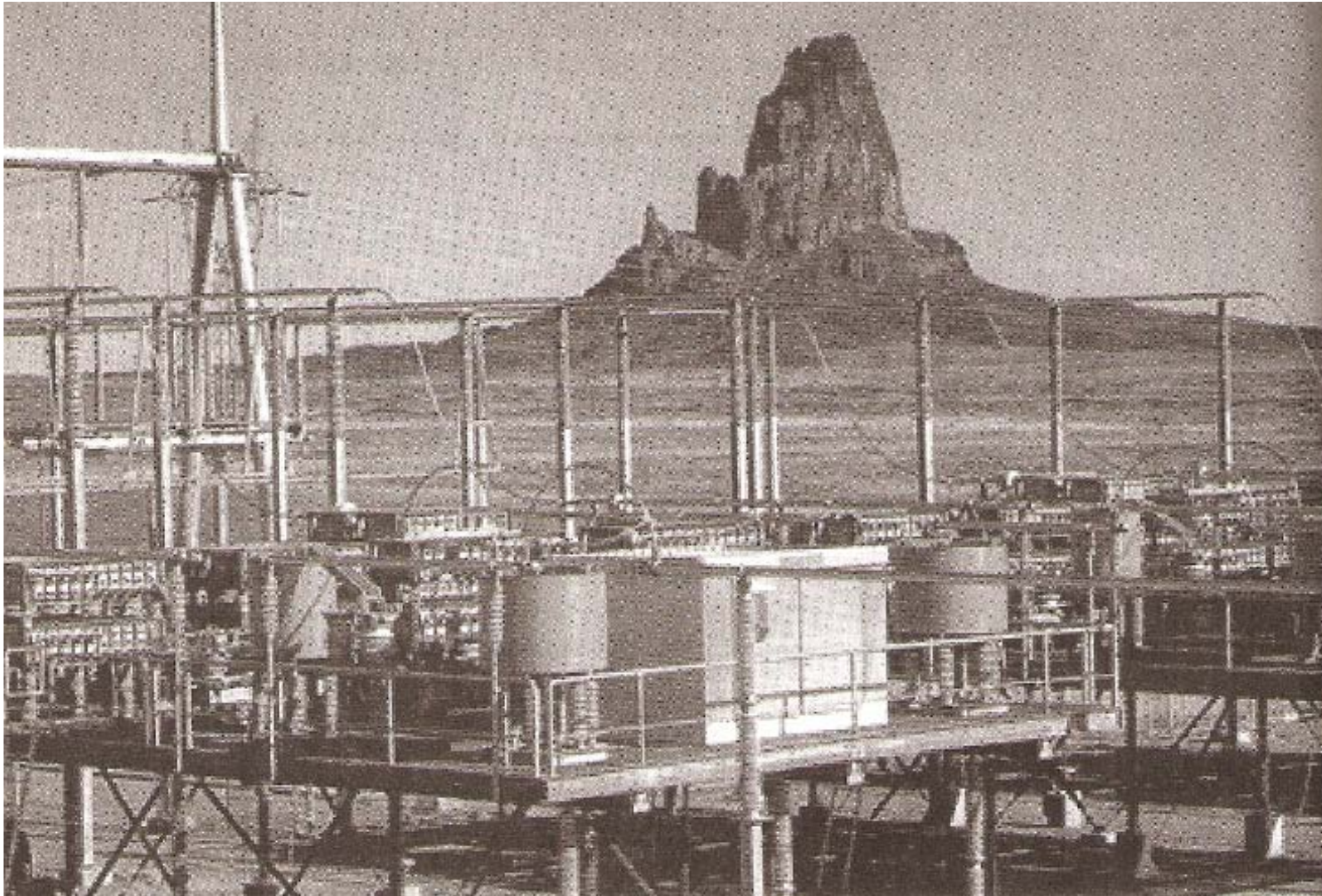


Diagrama de bloques de un sistema de generación de electricidad en base a la energía eólica de tercera generación.

**IVb-Conversion AC-AC sin cambio de frecuencia (control de potencia AC).**

**Sistemas de transmisión de energía eléctrica flexibles (FACTS: Flexible AC Transmission Systems): muy alta tensión (desde varios centenares de kV a 1MV+), alta corriente (kA), alta potencia (MW).**



Vista de una de las tres fases del sistema FACTS (tipo TCSC) de la subestación Kayenta (USA) con 45MVA de capacidad de compensación.

Control de temperatura por calentamiento resistivo en procesos industriales: potencia media/alta (kW a MW+)

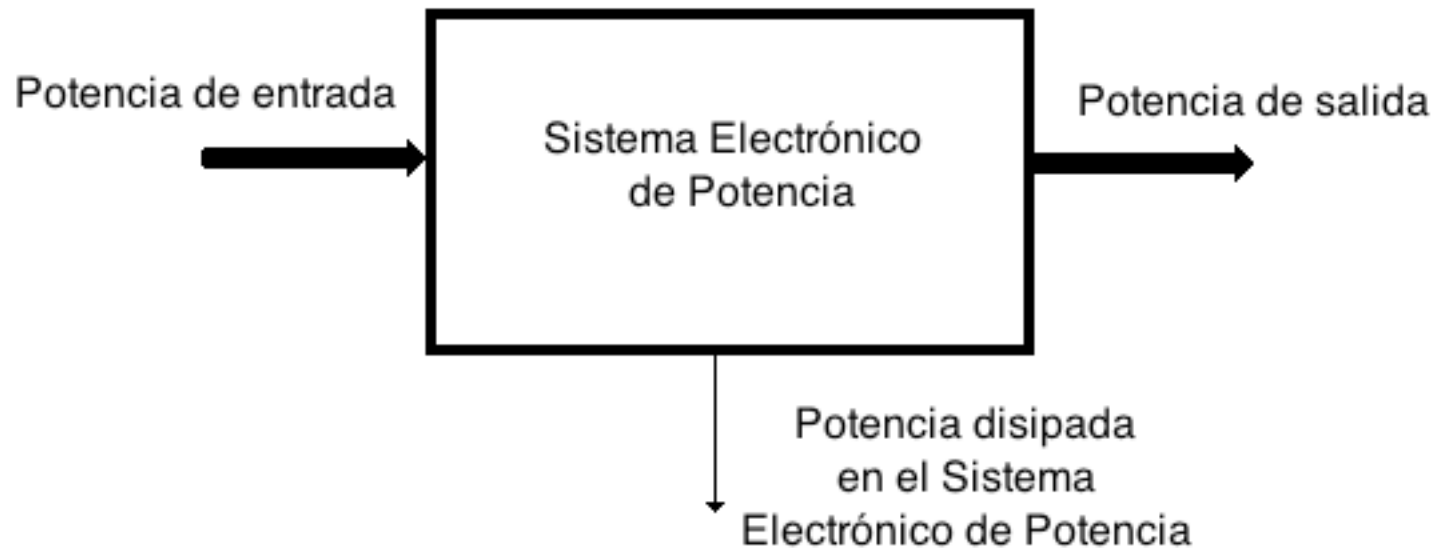
Control de luminarias incandescentes (doméstico/industrial): potencia baja/alta (W a kW+)

Control de motores AC (inducción y universales): potencia baja/media (hasta HP+), tensión "doméstica" (120/220 V).



**Objetivo fundamental: la eficiencia energética.**

**En todo sistema electrónico la eficiencia energética es importante, pero en un sistema electrónico de control de potencia, la eficiencia energética es fundamental.**



**Esquema del flujo de potencia en un Sistema Electrónico de Potencia.**

En todo sistema se cumple:

$$P_e = P_s + P_{ds}$$

Donde  $P_e$  es la potencia entregada por la fuente primaria de energía eléctrica,  $P_s$  es la potencia entregada al sistema que requiere la potencia eléctrica y  $P_{ds}$  es la potencia que se disipa en el sistema electrónico de potencia.

La eficiencia energética del sistema,  $\eta$ , que es uno de los parámetros mas importantes de un circuito electrónico de potencia se define como:

$$\eta = \frac{P_s}{P_e}$$

Idealmente la eficiencia del sistema debería ser 1, pero esto es imposible de alcanzar, ya que requiere que todos los componentes del sistema sean ideales; sin embargo es responsabilidad del diseñador intentar alcanzar la mayor eficiencia que sea posible en el estado actual de la tecnología, siempre, por supuesto, que además se cumplan los otros objetivos del equipo.

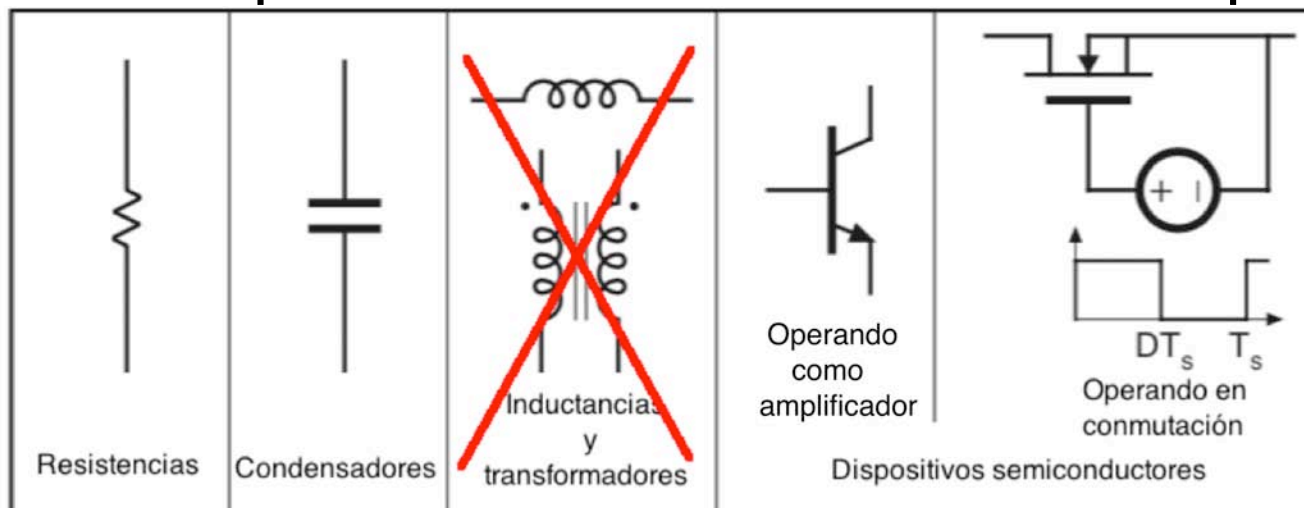
Los equipos electrónicos de potencia en muchos casos están en uso permanente (24/365), o por lo menos durante toda la jornada de trabajo, y deben operar a lo largo de una vida útil de decenas de años, por lo que el

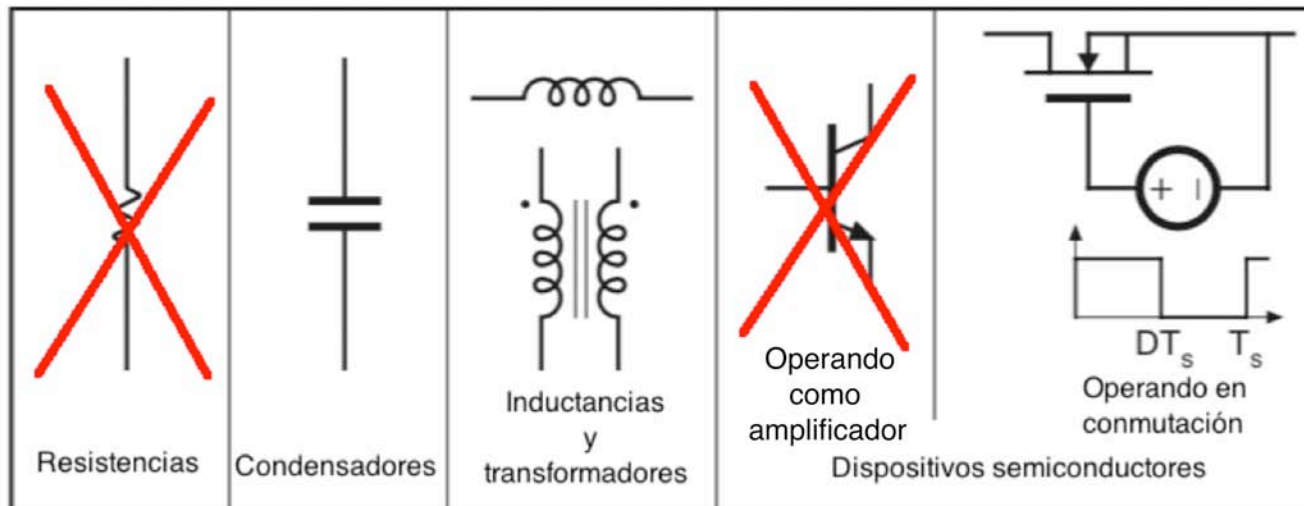
costo acumulado de la energía disipada puede ser una parte importante del costo total del equipo, que debe calcularse incluyendo el costo de adquisición, y los valores actuales estimados de los costos de instalación, de operación (que incluye el costo de la energía consumida), de mantenimiento y de des-incorporación.

También hay que tener en cuenta que cada vez el porcentaje de la energía eléctrica que es manipulada por lo menos por una etapa electrónica de potencia es cada vez mayor, y ya se estima que en USA ese porcentaje es del orden del 60%.

La importancia fundamental de la eficiencia hace que los circuitos electrónicos de potencia se diferencien de los circuitos de procesamiento de la información en la selección de los componentes que los integran. En un

circuito de manejo de información, la selección habitual de componentes evita inductancias y transformadores, mientras que en un circuito de manejo de potencia los componentes inductivos (inductancias transformadores) suelen ser imprescindibles, y los elementos que se evitan son las resistencias y los dispositivos semiconductores operando en su zona de amplificación, ya que ambos tipos de componentes son esencialmente disipativos.





Selección de componentes: Circuito de manejo de señal (arriba),  
circuito de manejo de potencia (abajo).

Condicionantes absolutos de la etapa de manejo de potencia en un circuito de electrónica de potencia

- 1.- Debe bloquear la máxima tensión posible en el sistema fuente-carga, con un margen de seguridad adecuado incluso durante las fallas previsibles.

2.- Debe conducir la máxima corriente posible en el sistema fuente-carga, con un margen de seguridad adecuado incluso durante las fallas previsibles.

3.- La potencia disipada debe ser la mínima posible, y no sobrepasar los límites impuestos por las características térmicas de los componentes, manteniendo un margen de seguridad adecuado incluso durante las fallas previsibles.

Para cumplir con el objetivo fundamental de minimizar las pérdidas es necesario que:

1.- Los componentes electrónicos de control de potencia operen siempre en régimen de baja pérdida (corte/saturación). La operación en la zona de altas pérdidas (región lineal) de sus curvas características

solo será permisible en régimen transitorio durante la conmutación.

2.- El uso de resistencias sea minimizado. Hasta donde sea posible estos elementos nunca deben colocarse en el camino principal de la corriente.

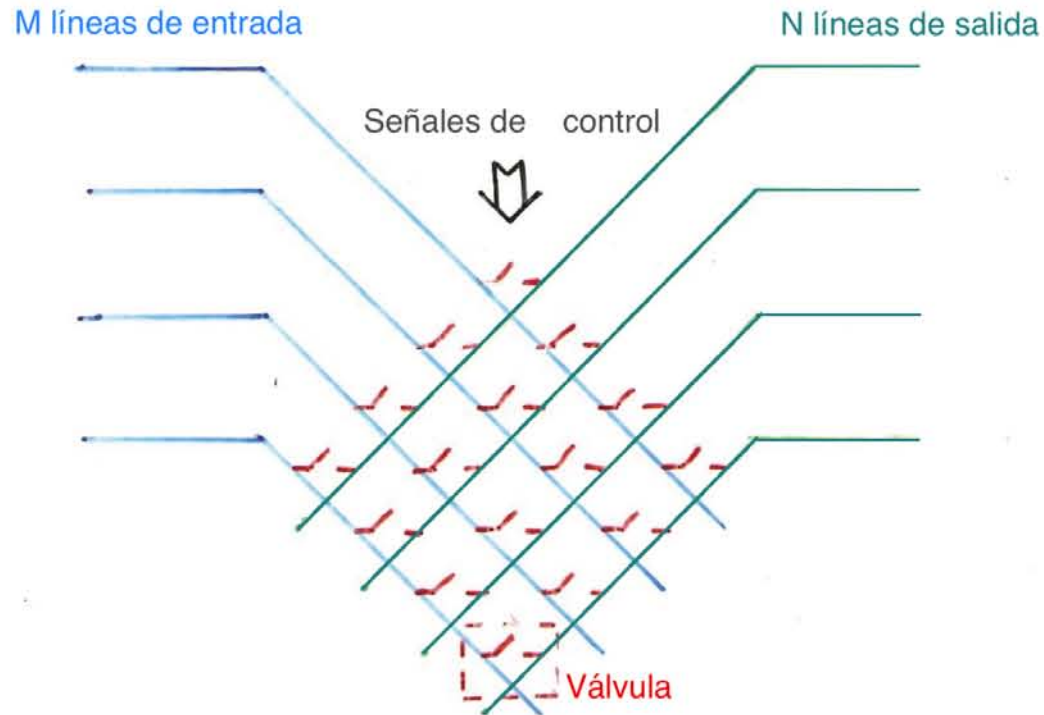


La configuración ideal genérica de un circuito electrónico de potencia es una matriz de conmutación en donde cada una de las  $M$  líneas de entrada puede ser conectada a cada una de las  $N$  líneas de salida por medio de elementos circuitales (llamados usualmente válvulas) comandados por el sistema de supervisión y control.

Por convención se asume que el puerto de entrada es el situado a la izquierda del dibujo y el de salida es el situado a la derecha.

Las conexiones AC, sean entradas o salidas, siempre se llaman “líneas”.

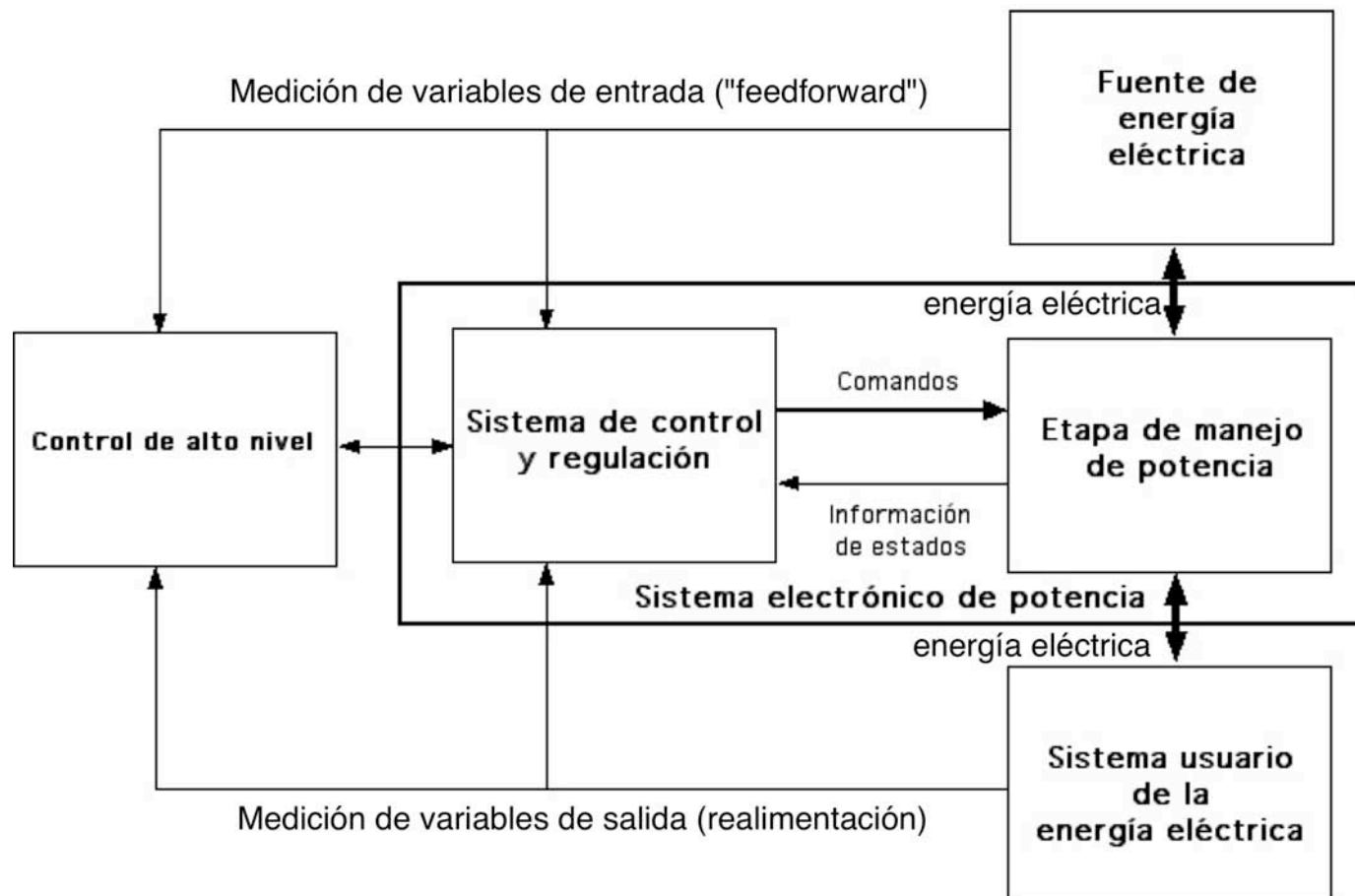
Las conexiones DC, sean entradas o salidas, se suelen llamar “barras”.



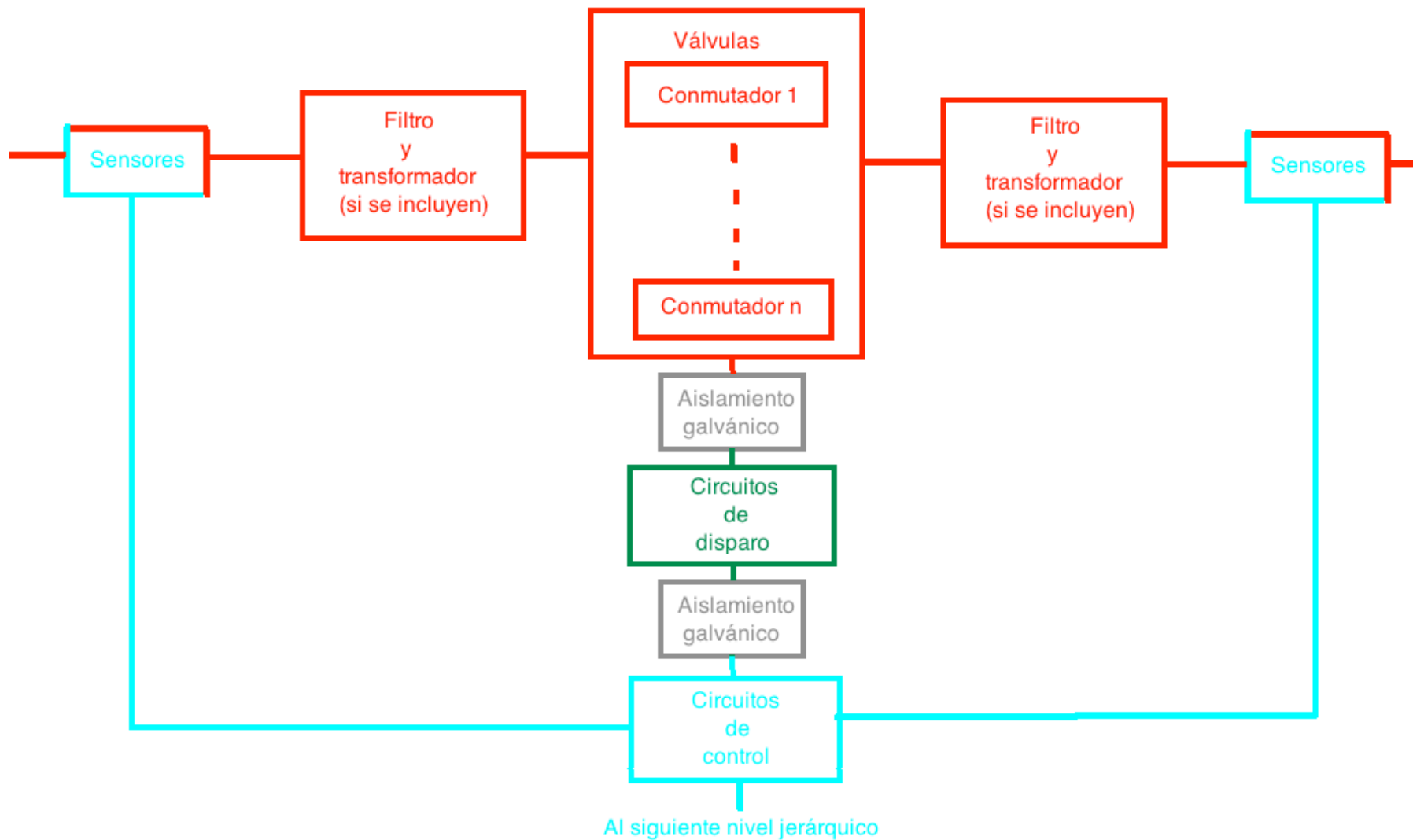
Estructura de la matriz de conmutación de un conversor genérico con  $M$  entradas y  $N$  salidas.

# Sistema electrónico de potencia ó Convertor de potencia

Es el arreglo de los circuitos (válvulas) que forman la matriz de conmutación, de los sistemas de supervisión y medición y de los equipos auxiliares de entrada y salida (filtros, transformadores, dispositivos electromecánicos de conexión, enfriamiento y protección, etc.) necesarios para cumplir la función de conversión de energía deseada.



Las flechas indican el sentido del flujo de energía o información, y el grosor de las líneas los niveles de potencia relativos.



**Bloques funcionales en un conversor genérico.**

**Rojo: nivel de alta potencia**

**Verde: Nivel de potencia media**

**Azul: Nivel de baja potencia**

**Gris: Cambio de nivel de potencia con aislamiento galvánico.**

Dentro del sistema electrónico de potencia se pueden individualizar los siguientes subsistemas:

1.- Subsistema de potencia: la matriz de conmutación y los elementos directamente conectado en el camino entrada-salida. En este subsistema el nivel de potencia manejado es "alto".

2.- Subsistema de interfaz: los elementos de interconexión entre los subsistemas de "potencia" e "información". En este subsistema el nivel de potencia manejado es "intermedio".

3.- Subsistema de manejo de información: los elementos de medición y control. En este subsistema el nivel de potencia manejado es "bajo".

En general no es posible conectar directamente elementos con niveles de potencia significativamente distintos, lo que obliga a mantener una separación galvánica entre tres subconjuntos dentro del sistema electrónico de potencia.

En aplicaciones con entrada y/o salida AC puede ser necesario incluir transformadores entre los niveles de tensión de entrada y/o salida y los convenientes para la matriz de conmutación.

La acción de la matriz de conmutación introduce cortes en las formas de onda, lo que genera armónicas de corriente y de voltaje en las líneas de entrada y salida, obligando a incluir filtros para reducir su nivel a valores que cumplan con las especificaciones del diseño y la normativa correspondiente.



## Válvula.

Es el arreglo de dispositivos electrónicos de control de potencia (conmutadores electrónicos) con los circuitos de control de disparo, de ayuda a la conmutación (amortiguadores o "snubbers") y de protección necesarios para la conexión segura entre una línea de entrada y otra de salida en el circuito principal de potencia del conversor.

El componente de control de potencia ideal es el interruptor ideal, que debe tener cero caída de tensión en conducción y cero corriente de fuga en bloqueo, de forma que en ambos estados la disipación de energía es nula.

Adicionalmente el interruptor ideal debe ser capaz de permitir la circulación de corriente en forma controlada en las dos direcciones.

La búsqueda de dispositivos que se aproximen a estas características empezó desde finales del siglo XIX y se intensificó a medida que la electricidad se fue imponiendo como la energía dominante en el mundo industrializado, gracias a su inmensa versatilidad, ubicuidad y, a medida que progresaba la electrónica de potencia, facilidad de control en aplicaciones cada vez mas numerosas e importantes.

Los componentes de potencia disponibles en la actualidad aún están lejos de ser ideales, por lo que los circuitos no son 100% eficientes y tienen un límite superior a su frecuencia de operación.

Por lo tanto es preciso conocer las limitaciones impuestas por los materiales y los procesos de fabricación de los que dependen las características reales de los componentes tanto para entender los límites actuales como los futuros desarrollos posibles.

Por el sentido de circulación de la corriente los dispositivos se clasifican en dos tipos:

- 1.- Unidireccionales: La corriente circula en el dispositivo en una sola dirección. Esto es una limitación, el ideal debe operar en las dos direcciones

2.- Bidireccionales: La corriente circula en el dispositivo en las dos direcciones. Estos se acercan en esta propiedad a ideal, pero en la práctica son menos numerosos que los unidireccionales

En el estado actual de la tecnología, los dispositivos de control de potencia disponibles en el mercado están principalmente implementados en silicio, Si, aunque se están realizando avances importantes en dispositivos a base de Carburo de Silicio (Silicon Carbide), SiC, y de Nitruro de Galio (Gallium Nitride), GaN, que están empezando a encontrarse en el mercado.

Aunque las características específicas (voltaje de bloqueo, corriente máxima, etc.) de los dispositivos dependen del semiconductor empleado para fabricarlos, los dispositivos se pueden agrupar en tres categorías

genéricas cuyas características de control no dependen del material empleado en su construcción.

Tipos de dispositivos electrónicos de control de potencia, según la capacidad de control de estado:

1. No controlados.
- 2.- Semicontrolados.
- 3.- Completamente controlados.

1.- No controlados (diodos): son dispositivos unidireccionales de dos terminales (ánodo, "A" y cátodo, "K") cuyo estado (encendido/apagado) depende exclusivamente de las condiciones definidas en el circuito externo: Si el ánodo está polarizado con tensión positiva con respecto al cátodo el diodo conduce (estado "encendido"); una vez en conducción el diodo pasa al estado de no conducción ("apagado") cuando la corriente AK se hace cero.

Idealmente en el estado de conducción la caída de tensión A-K debe ser cero (impedancia de conducción igual a cero), y la corriente inversa, cuando el cátodo es positivo con respecto al ánodo debe ser cero (impedancia de bloqueo inverso infinita).

Idealmente los cambios de estado deben ser instantáneos cuando cambian las condiciones externas de polarización A-K.

En el mercado se encuentran tanto diodos de Si (la mayoría) como diodos de SiC.

2.- Semicontrolados: Llamados en general SCR (Silicon Controlled Rectifiers, Rectificadores Controlados de Silicio) o Tiristores (Thyristors), son dispositivos unidireccionales de tres terminales (ánodo, A, cátodo, K, y compuerta, G "Gate"). La condición necesaria para que circule corriente A-K es que la tensión externa A-K sea positiva, pero esto no es condición suficiente; para que se produzca la entrada en conducción (disparo) del dispositivo es necesario además que se aplique un pulso de corriente en el terminal de compuerta. El paso del estado de conducción al de no conducción (apagado) solo depende de las condiciones definidas en el circuito externo y se produce cuando deja de circular corriente AK y la tensión A-K se hace negativa.



Las consideraciones sobre el SCR ideal son las mismas que para el diodo ideal.

En la actualidad además de los tiristores de Si existen también de SiC.

Un tipo especial de dispositivos semicontrolados, los TRIACs, son bidireccionales, esto es, capaces de conducir corriente en las dos direcciones.

Los TRIACs están optimizados para operar como conmutadores AC a la frecuencia de línea.

3. Completamente controlados: El estado del dispositivo (encendido/apagado) depende de las condiciones definidas en el circuito externo y de las acciones de un terminal auxiliar de control.

Actualmente existen cuatro grupos de dispositivos completamente controlados:

1.- Transistores bipolares de juntura (BJT). Son dispositivos unidireccionales cuya corriente Colector-Emisor está definida por la corriente inyectada en el terminal de control, la base. La mayoría son de Si, pero ya se están ofreciendo de GaN.

2.- Transistores Metal-Oxido-Semiconductor de efecto de campo de potencia (Power-MOSFET). Son dispositivos bidireccionales cuya corriente Drenador-Emisor (Drain-Emitter) está definida por la tensión aplicada entre el terminal de control, la compuerta (Gate) y el emisor.

La estructura del MOSFET de potencia incluye un diodo inverso, por lo que el PowerMOSFET puede conducir corriente en las dos direcciones, corriente controlada entre D y S, y corriente no controlada (corriente inversa) entre S y D.

La mayoría en el mercado son PowerMOSFETs de Si, pero también se ofrecen de SiC

3.- Transistores bipolares de compuerta aislada, IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors). Son dispositivos unidireccionales que se comportan como un híbrido entre un BJT y un PowerMOSFET; cuya corriente Colector-Emisor está definida por la tensión aplicada entre el terminal de control, la compuerta (Gate) y el emisor.

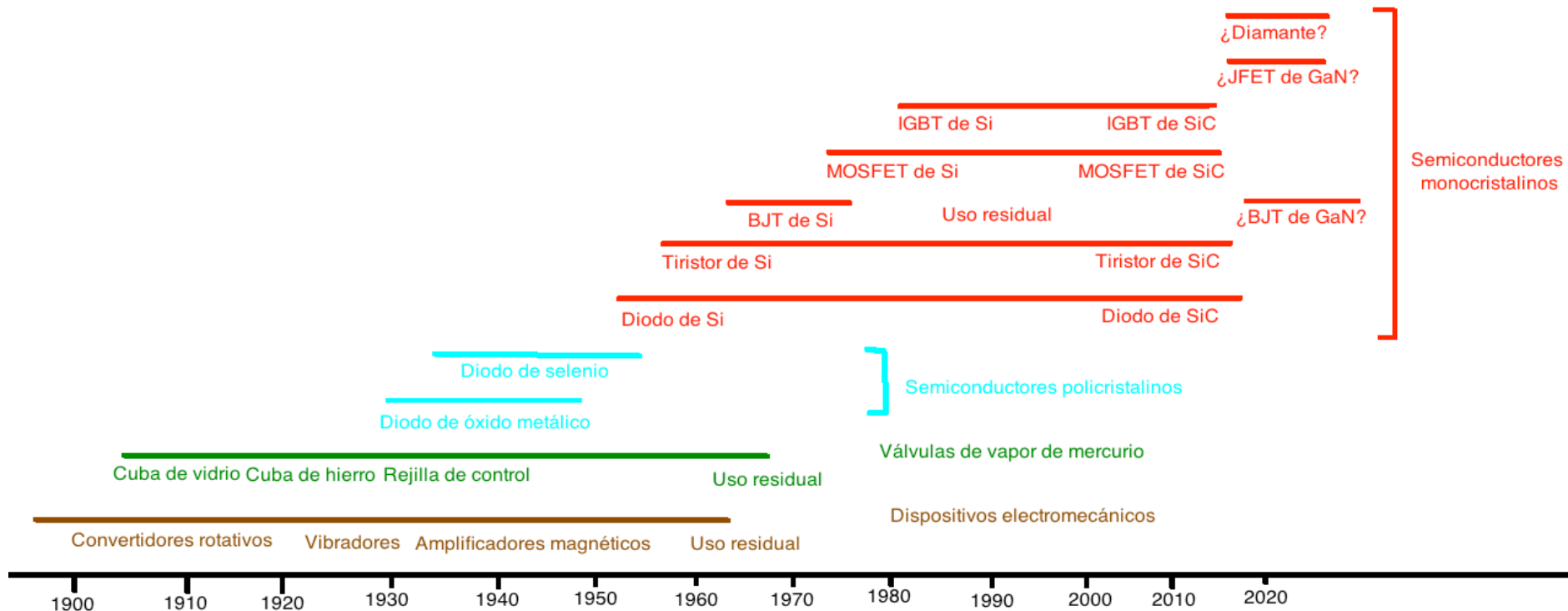
4.- Rectificadores controlados apagados por compuerta, GTOs (Gate Turn-Off). Son dispositivos unidireccionales del tipo tiristor, optimizados para que puedan ser apagados extrayendo corriente desde su terminal de compuerta.

En general son dispositivos de conmutación relativamente lenta, optimizados para operar a niveles de tensión y corriente muy elevados.

Se está realizando una investigación muy activa en nuevos dispositivos conmutadores completamente controlados, por lo que es posible que en el futuro aparezcan en el mercado familias adicionales, algunas de las cuales están ya siendo probadas fuera de los laboratorios de desarrollo.

### Evolución histórica:

La búsqueda de componentes cada vez mas cercanos al ideal, por supuesto aún no concluida, ha ido considerando tecnologías cada vez de mayor nivel de integración, en el desarrollo y la aplicación práctica de las cuales se pueden considerar cuatro etapas sucesivas:



## Evolución de las tecnologías aplicadas a la Electrónica de Potencia.

Fechas aproximadas, solo se incluyen los dispositivos no experimentales que lograron penetración en el mercado.

1.- Sistemas mecánicos y electromecánicos, basados en interruptores y electroimanes (línea marrón en la gráfica).

Siguen en uso en aplicaciones específicas, y es razonable asumir que no van a ser reemplazados en esos nichos en el futuro previsible.

2.-Dispositivos electrónicos de conducción termo-iónica (línea verde en la gráfica).

Los tubos de vacío siguen empleándose en las etapas de potencia de los grandes transmisores am/fm y también en aplicaciones de audio, ya que hay melómanos que afirman que la calidad del sonido producido por un amplificador a tubos es insuperable.

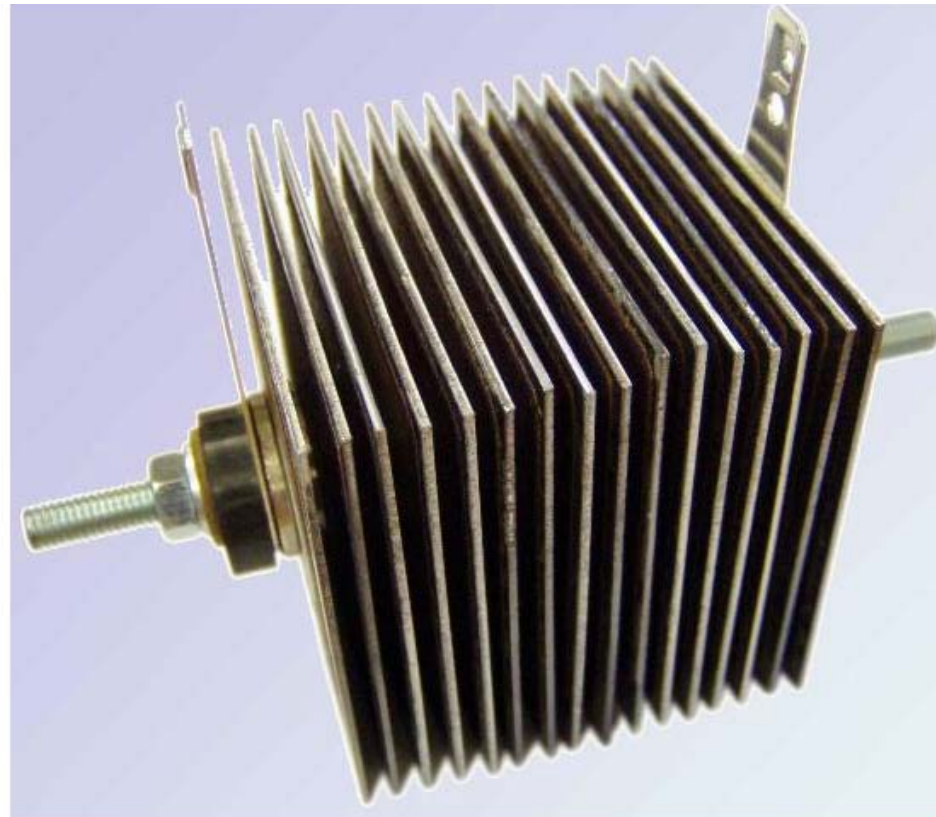
Los dispositivos de vapor de mercurio de muy alta potencia están en desuso, aunque pueden encontrarse en algunas instalaciones industriales viejas no modernizadas.



Diodo de vacío (izquierda) y Rectificador dodecafásico termo-iónico por vapor de mercurio (derecha).



3.- Dispositivos rectificadores de estado sólido en base a semiconductores amorfos (trazo turquesa en la gráfica).



Rectificador de placas de selenio.

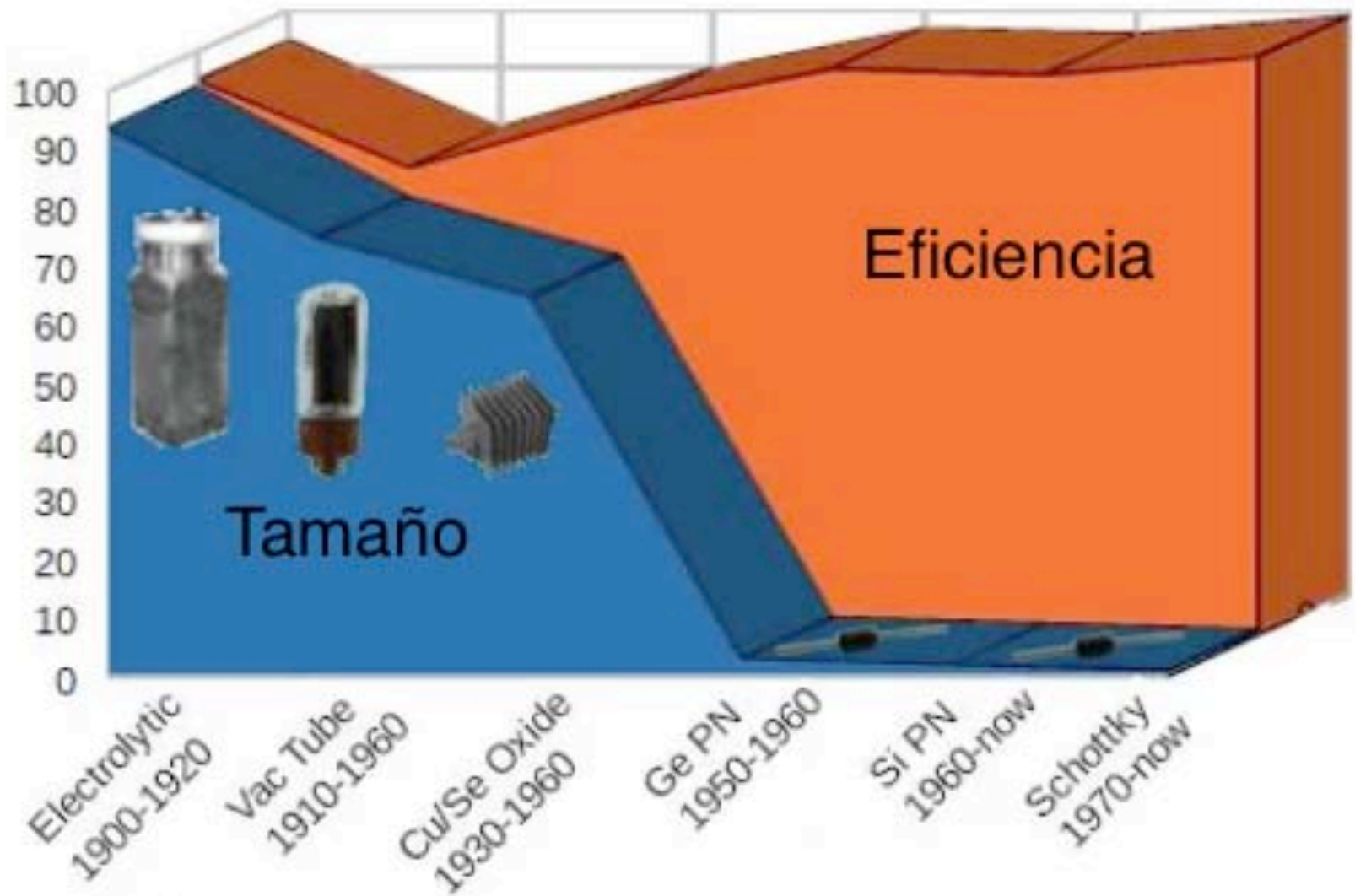
Estos componentes han salido completamente del mercado.

4.- Dispositivos electrónicos de control de potencia de estado sólido con semiconductores mono cristalinos.



Rectificador controlado de Silicio (SCR) tipo T2871, tensión de bloqueo 8000V, corriente promedio 2600A a una temperatura de juntura de 85°; diámetro 172mm, alto 35,4mm.  
(Cortesía Infineon)

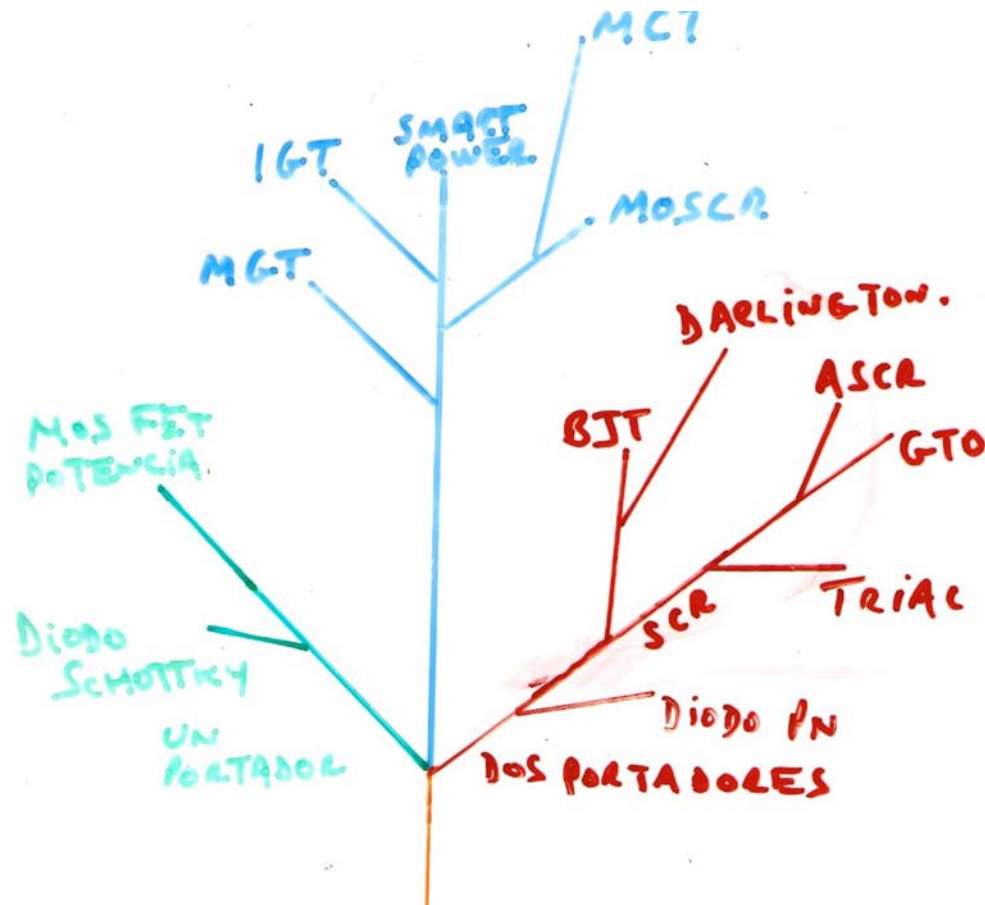
Los diodos fueron los primeros dispositivos electrónicos de control de potencia que aparecieron en el mercado a principios del siglo XX, y son los únicos que han sido ofrecidos en todas las tecnologías desarrolladas en dicho siglo (electrolíticos, de vacío, de vapor de mercurio, de semiconductores amorfos de óxidos de cobre y Selenio, de semiconductores monocristalinos de Germanio y de Silicio), y ya se están ofreciendo también en las dos tecnologías que están despuntando en el siglo XXI (semiconductores monocristalinos de Carburo de Silicio, SiC, y de Nitruro de Galio, GaN).



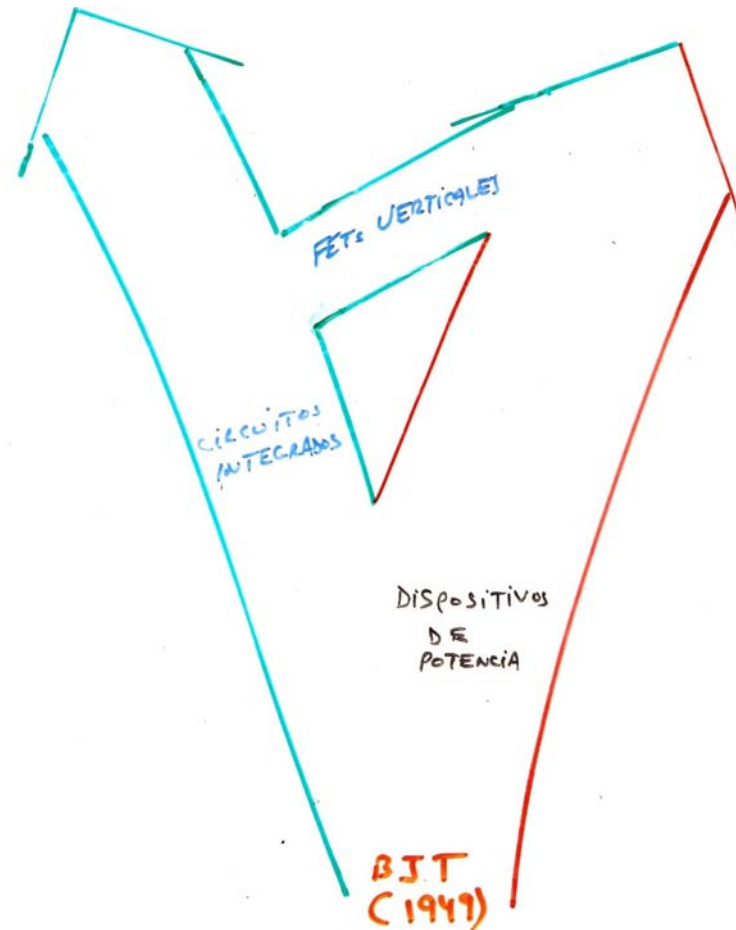
Evolución de los componentes tipo "diodo"

Los primeros componentes mono cristalinos en el mercado fueron diodos y transistores de Germanio (Ge), introducidos entre 1948 y 1953, rápidamente reemplazados por los de Silicio (Si).

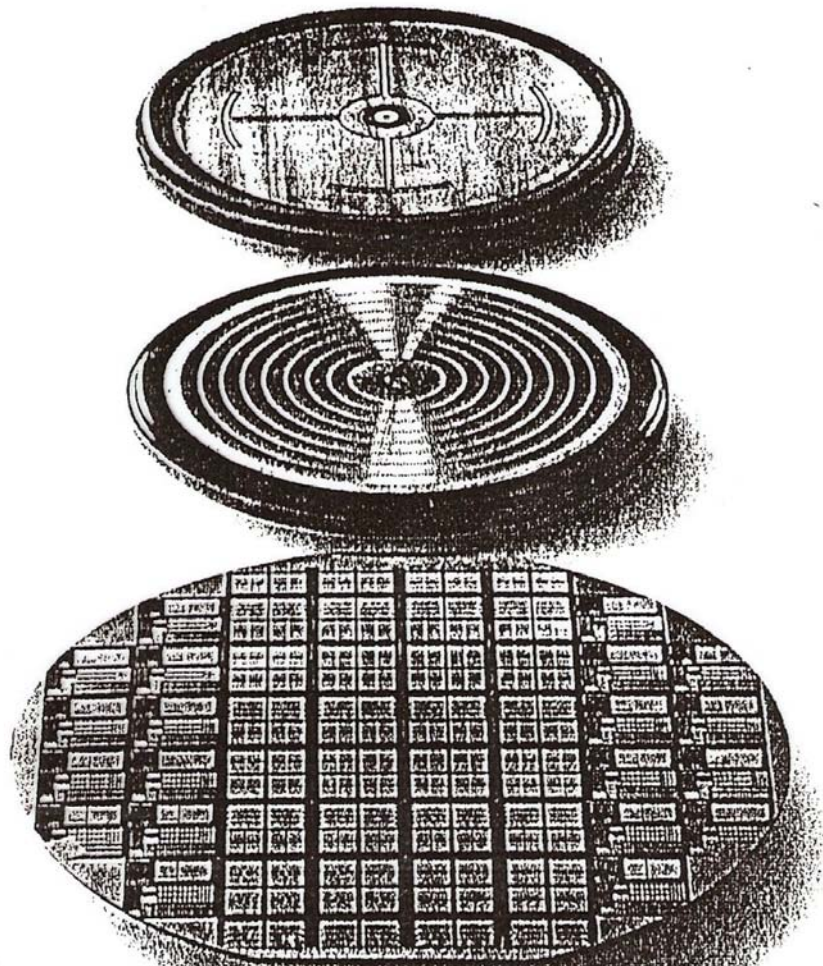
Desde el comienzo del desarrollo de la tecnología mono cristalina de potencia, la tendencia ha sido aumentar la capacidad de manejo de potencia, en base a aumentar el tamaño físico de los dispositivos, y elevar el nivel de complejidad de la estructura, para potenciar las capacidades de control y la velocidad de conmutación; esta tendencia se ha visto reforzada a partir de los 80s cuando se incorporaron a los dispositivos de control de potencia las tecnologías de desarrollo de componentes de alto nivel de integración de los circuitos digitales, empezando con los MOSFETs de potencia.



“Árbol genealógico” de los principales dispositivos electrónicos de control de potencia de estado sólido basados en el Si.



Esquema del desarrollo de la tecnología de estado sólido.  
Rojo: aumento del tamaño de los componentes  
Verde: aumento de la complejidad de los componentes



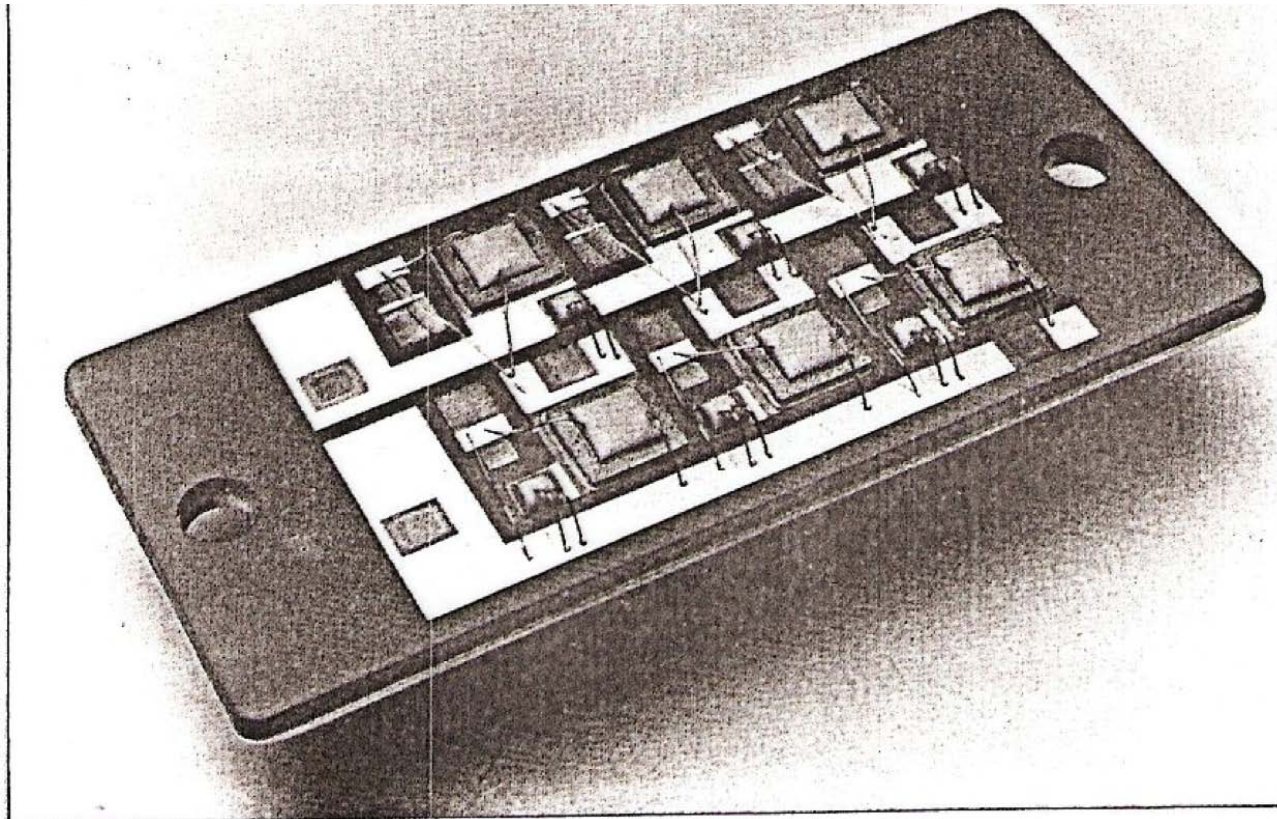
Aumento en la complejidad de los componentes.  
Arriba: SCR; Medio: GTO; Abajo: IGBTs en una oblea antes de la separación en componentes individuales.



## Tendencias actuales en el desarrollo de los componentes de potencia.

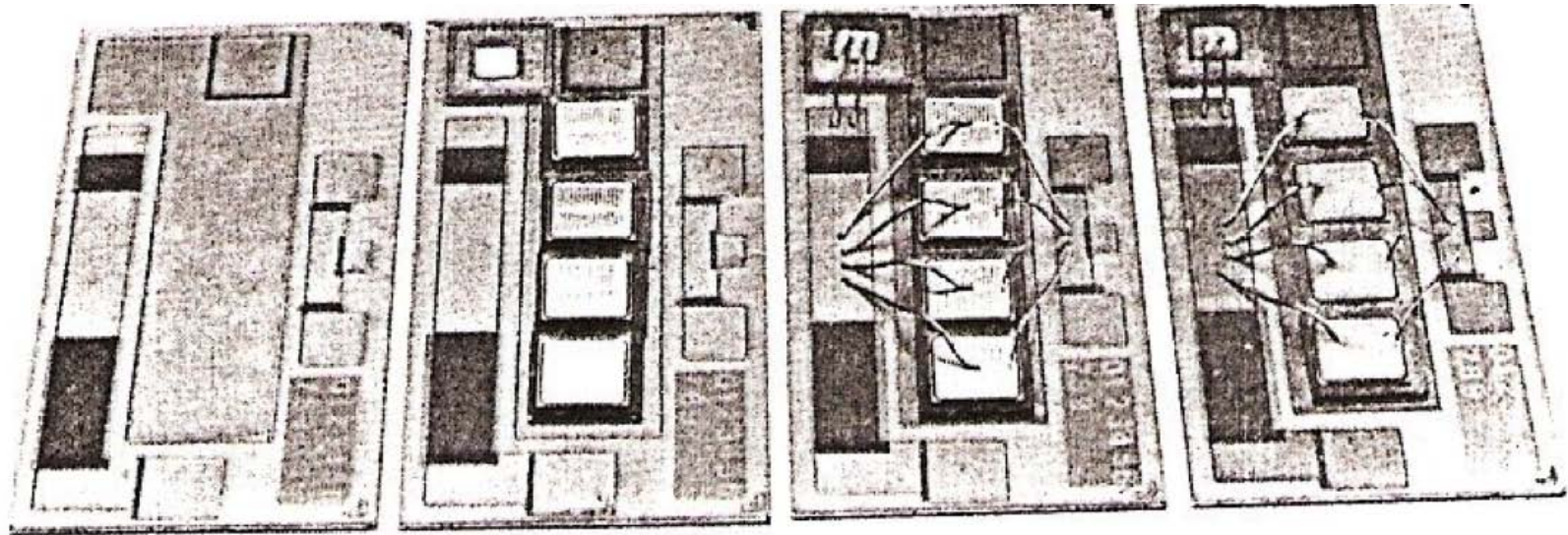
### 1.-Desarrollo de módulos con múltiples conmutadores.

El siguiente salto en la tecnología de los dispositivos electrónicos de control de potencia fue posible gracias a el desarrollo de compuestos cerámicos que simultáneamente son buenos conductores de calor y buenos aislantes eléctricos, lo que permitió desarrollar módulos de potencia que incluyen en un solo encapsulado un número de componentes de potencia interconectados para formar bloques funcionales como, por ejemplo, 6 IGBTs y 6 diodos para formar el circuito de potencia de un inversor trifásico.



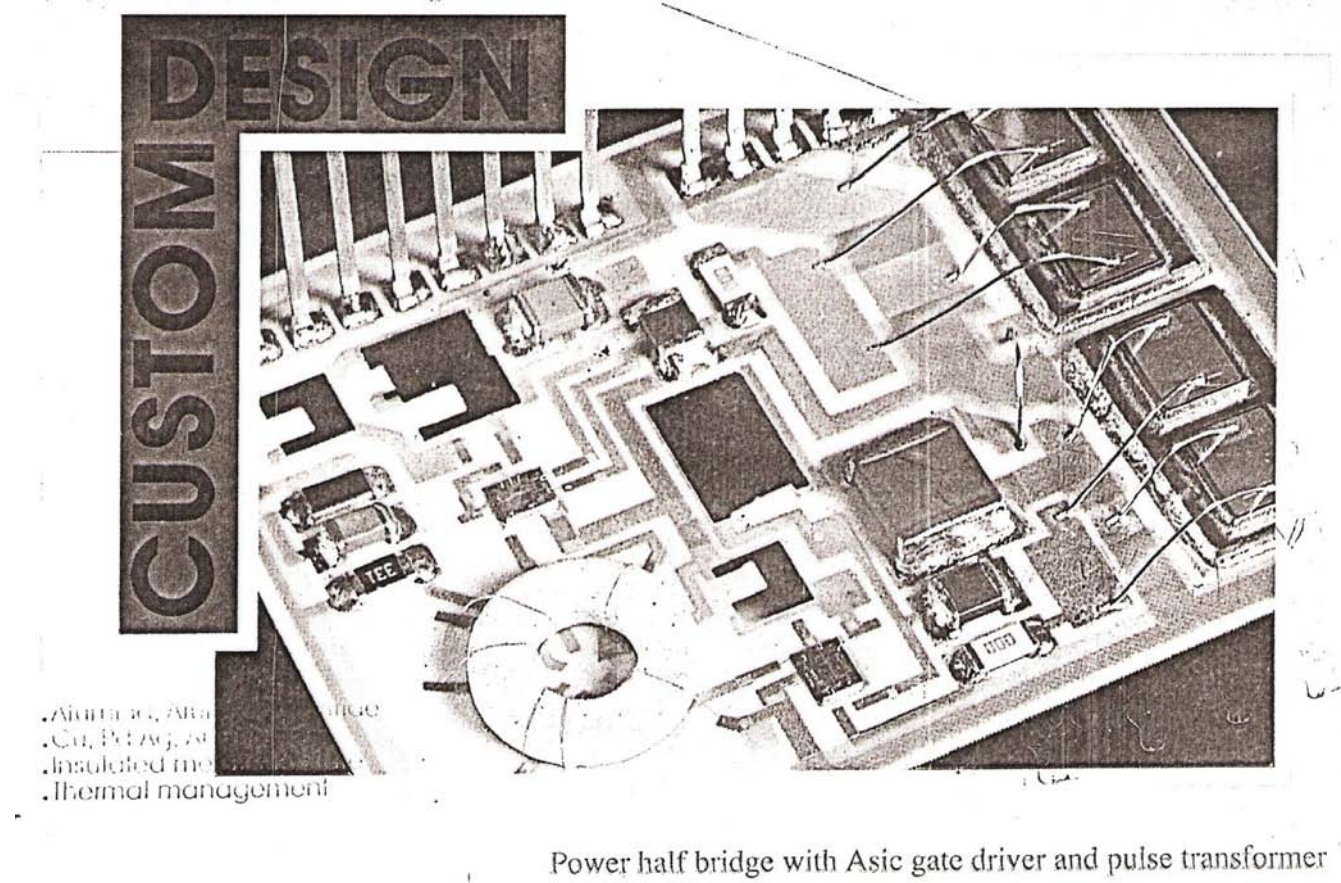
- Alumina, Aluminium nitride
- Cu, Pd Ag, Au thick film
- Insulated metal substrate
- Thermal management

**Etapa de potencia de un inversor trifásico integrada como un módulo. Vista antes del encapsulado final.**



Etapas de ensamblado de los componentes de potencia de un puente H en un módulo de potencia.

## II.-Desarrollo de módulos híbridos que integran la etapa de potencia y la de generación de señales de disparo.

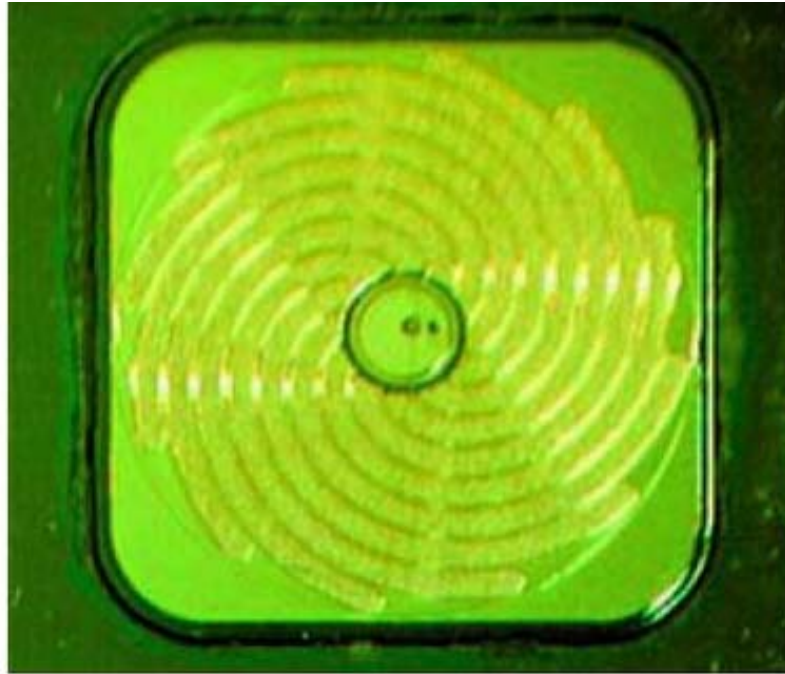


Híbrido “inteligente” que incluye la circuitería de control de disparo y la etapa de potencia en el mismo encapsulado.

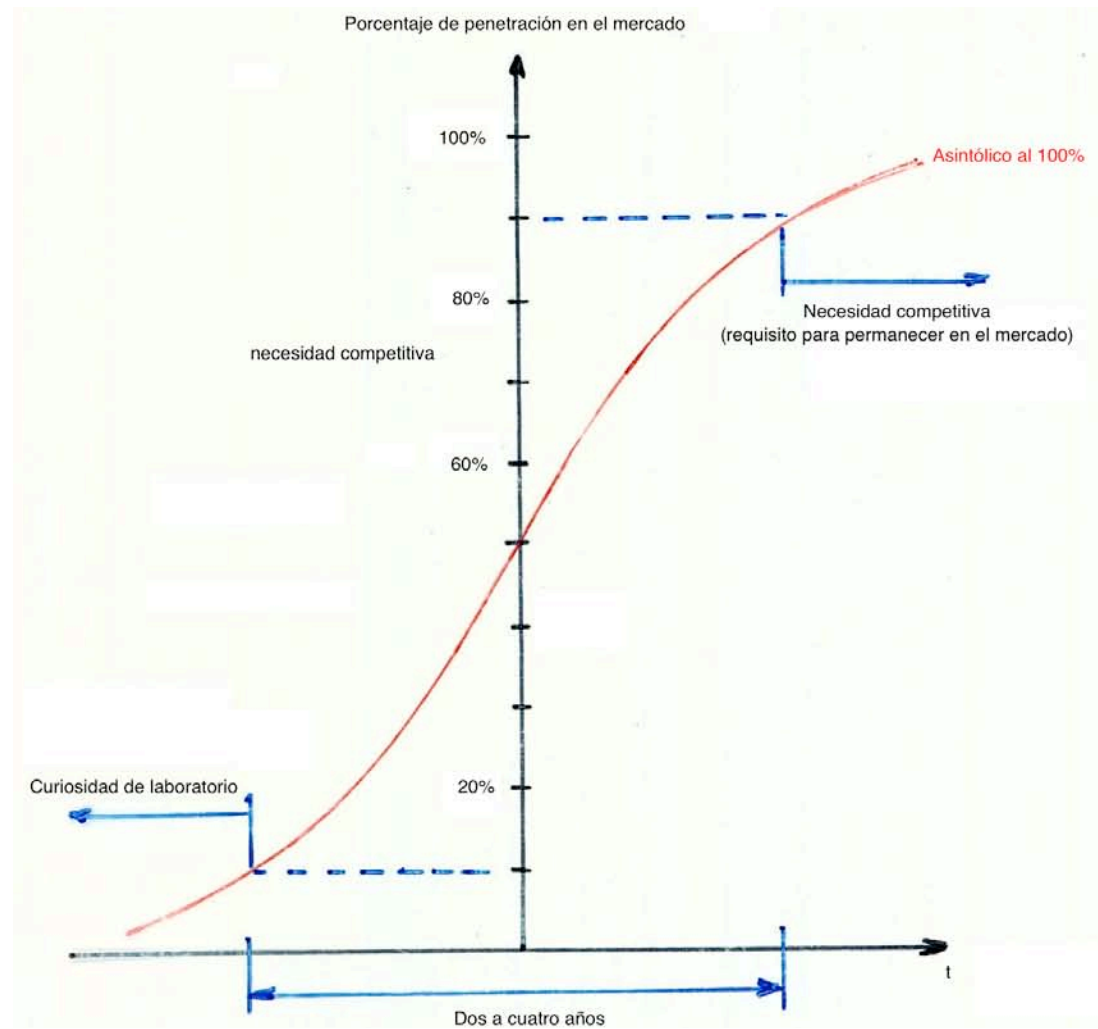


Volumen del mercado de MOSFETs e IGBTs en billones americanos ( $10^9$ ) de dólares, medido hasta 2016 y estimado hasta 2021.

Las tecnologías desarrolladas para los dispositivos electrónicos de control de potencia basados en el Si se han transferido al desarrollo de dispositivos basados en carburo de silicio, SiC, y nitruro de galio, GaN, lo que implica que la incorporación al mercado de componentes de estas nuevas tecnologías ocurrirá a una velocidad mayor.



Microfotografía de un GTO de SiC.

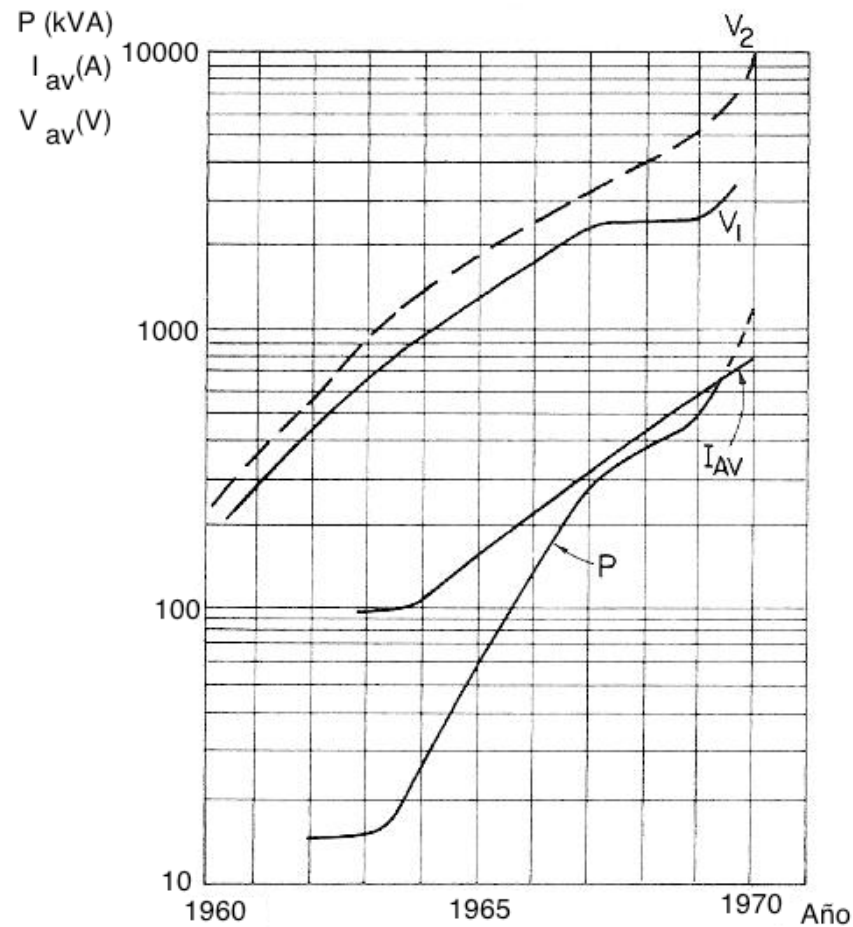


Curva empírica de penetración en el mercado de una innovación tecnológica electrónica exitosa.

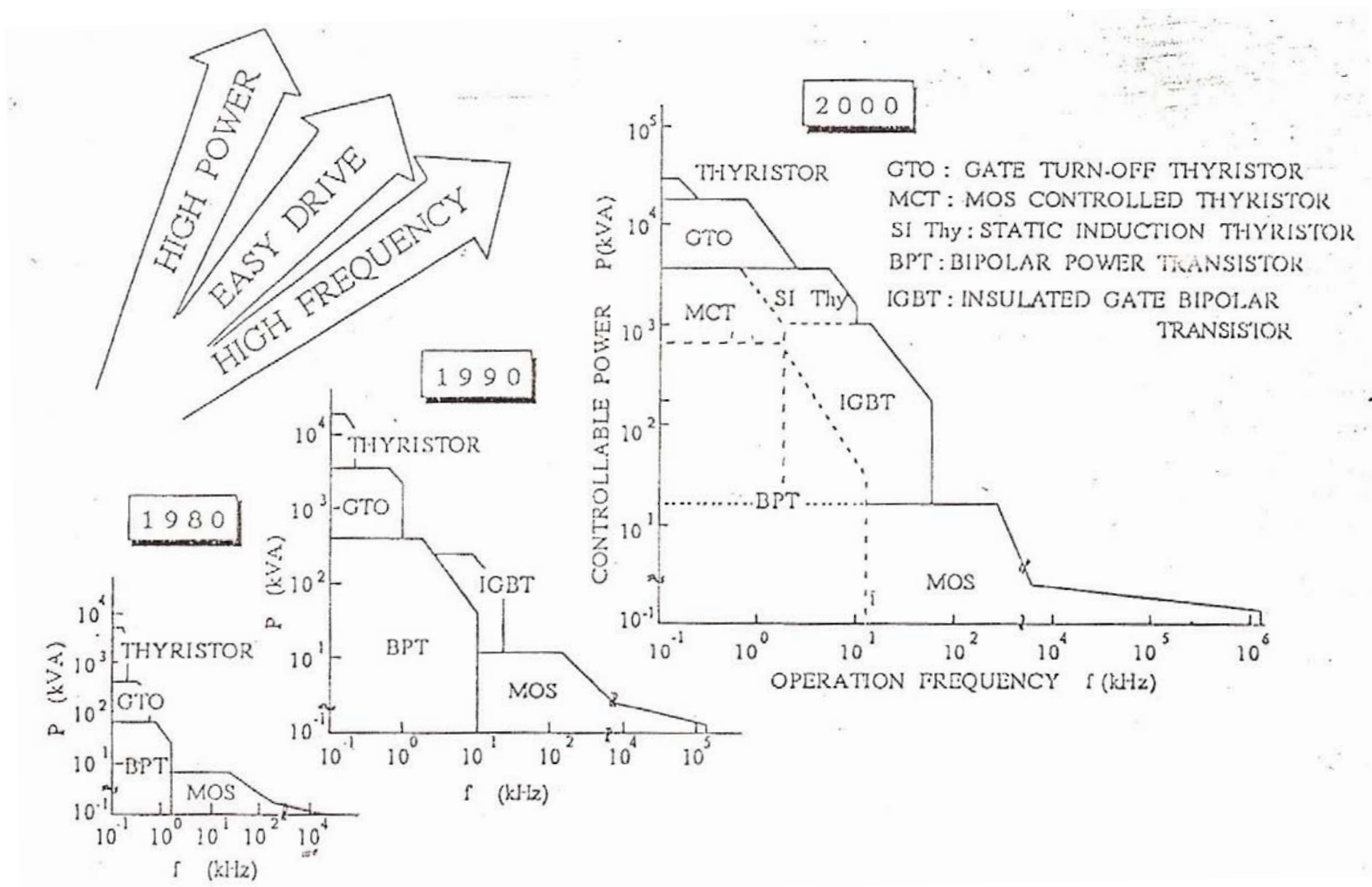


La curva de incorporación de una nueva tecnología electrónica ha sido hasta ahora muy rápida, y el dominio casi absoluto de los componentes basados en el Si puede cambiar completamente en un lapso relativamente muy corto si, tal como parece, las ventajas tecnológicas de los componentes de SiC y GaN sobre las de Si son razonablemente grandes y el diferencial de precio cae con suficiente velocidad.

Parece que la primera condición si se cumple, la segunda depende de la velocidad con la que invierta el capital necesario para que se incorporen mejoras en las líneas de producción que incrementen la productividad; por supuesto la magnitud de la inversión a su vez depende de la velocidad con la que crezca la demanda, en un mecanismo de realimentación positiva.

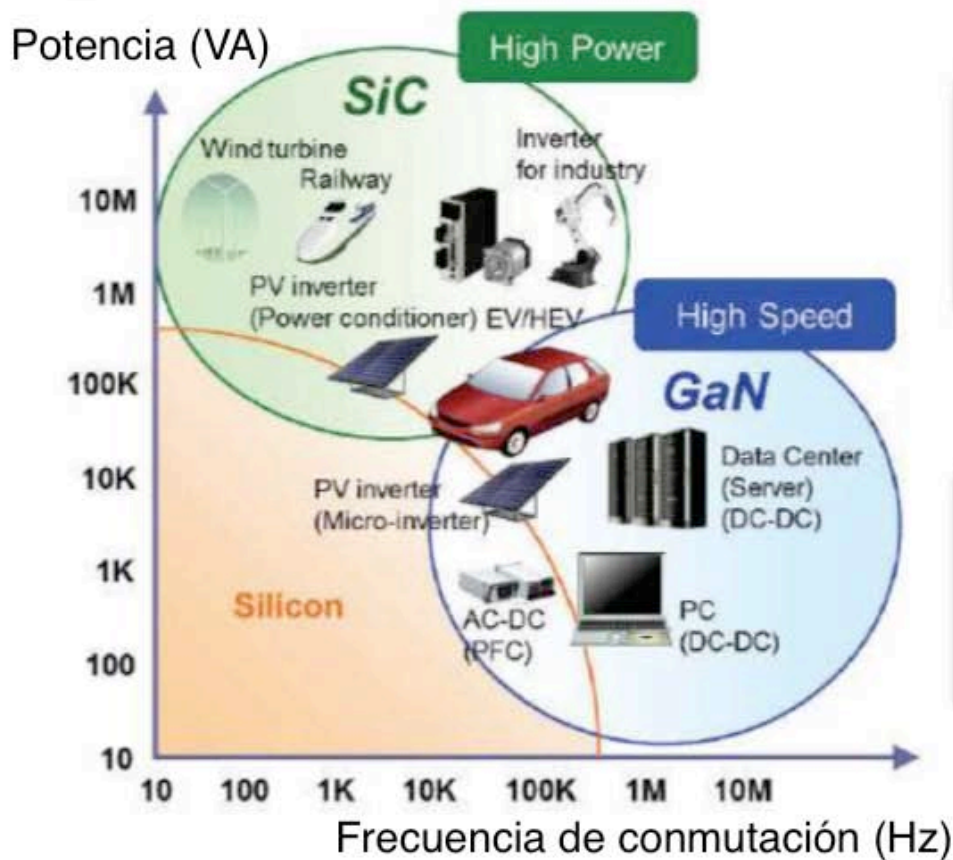


Aumento de la capacidad de los SCR el período de 10 años transcurrido desde su aceptación en el mercado hasta la madurez de la tecnología



Tendencia del desarrollo de los dispositivos electrónicos de control de potencia 1980-2000.

La tecnología del Si, alcanzó la madurez en 1980, cuando ya estaban definidos todos los componentes electrónicos de control de potencia importantes actualmente; en los 20 años transcurridos entre 1980 y 2000, la velocidad de conmutación de los componentes mas rápidos aplicables en la industria (no dispositivos de laboratorio) creció dos órdenes de magnitud gracias al desarrollo experimentado por los MOSFETs de potencia, la capacidad de manejo de potencia creció en un orden de magnitud y el mercado de las aplicaciones de media potencia, frecuencia de conmutación media fue casi completamente ocupado por los IGBTs, componentes que prácticamente no existían en 1980, y que para el 2000 ya eran los dominantes en el mercado, situación que se ha mantenido hasta la fecha.



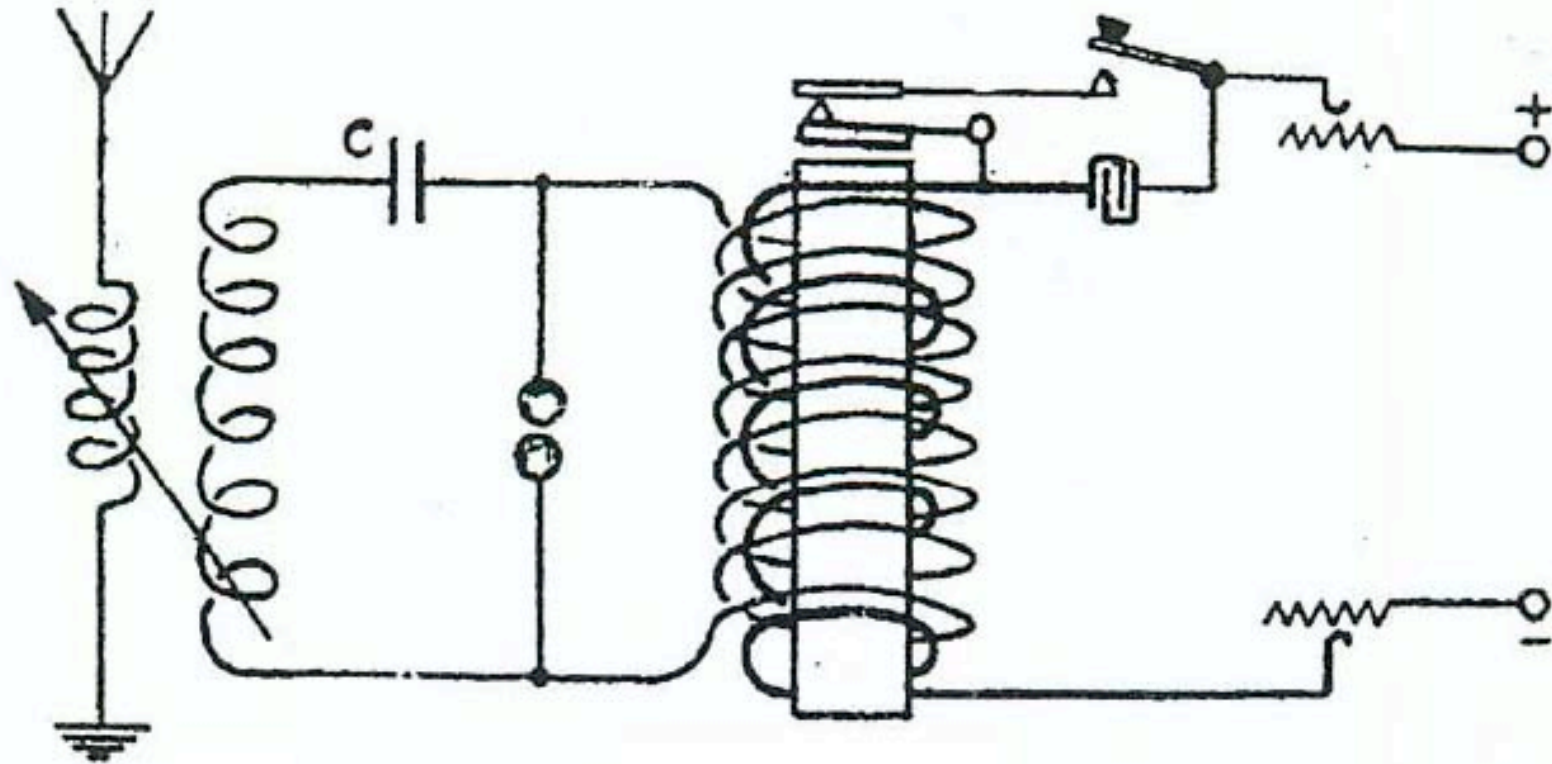
**SiC**  
 Para alta potencia,  
 altos voltajes y alta corriente.  
 Mercado de nicho

**GaN on Si**  
 Para alta frecuencia,  
 a potencias medias.  
 (<1kV, hasta 100A)  
 Mercado de masa

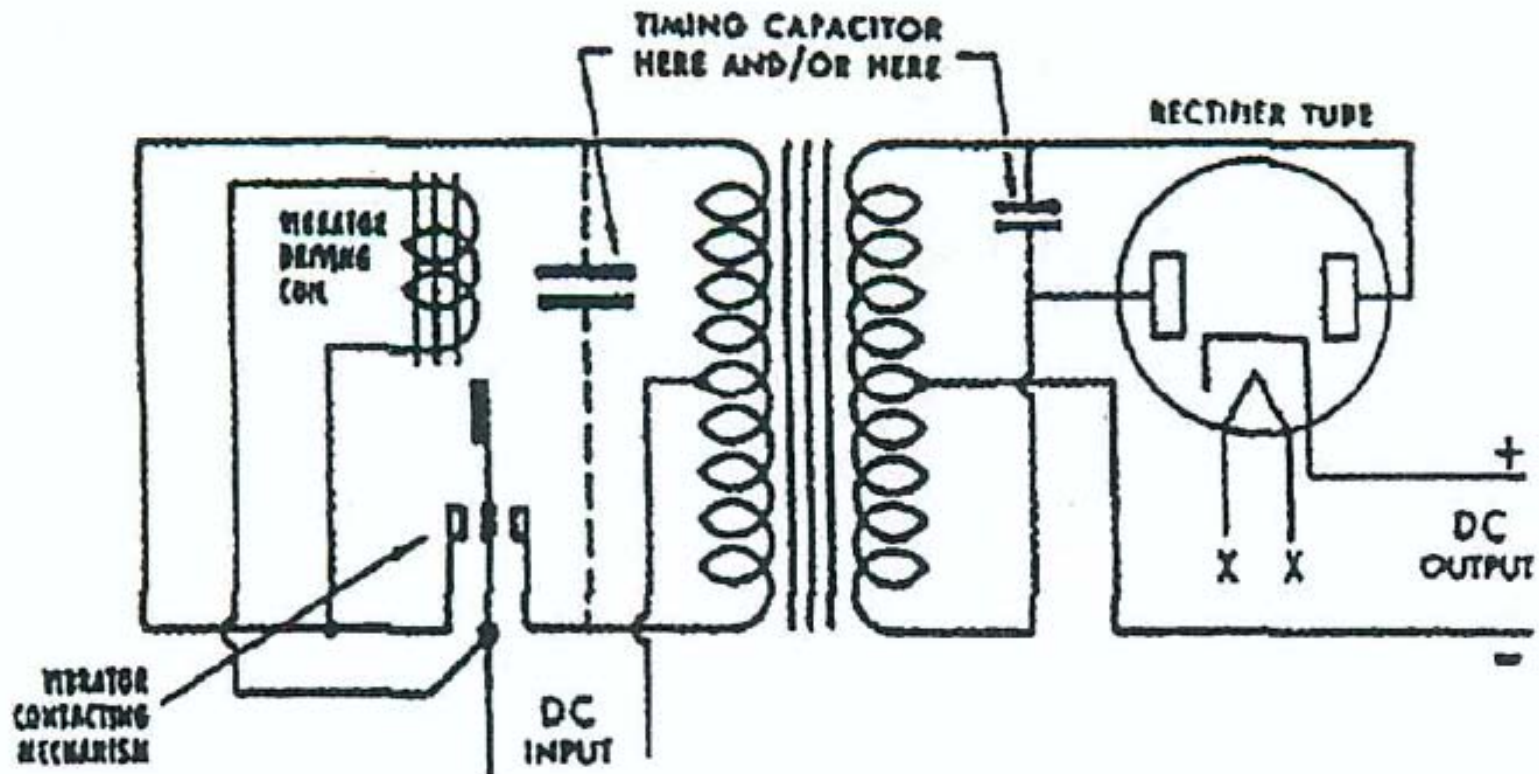
Source: „GaN-on-Si power transistors from French lab Leti”, CEA-Leti

Una predicción sobre el posible desarrollo de la tecnología de los dispositivos electrónicos de control de potencia.

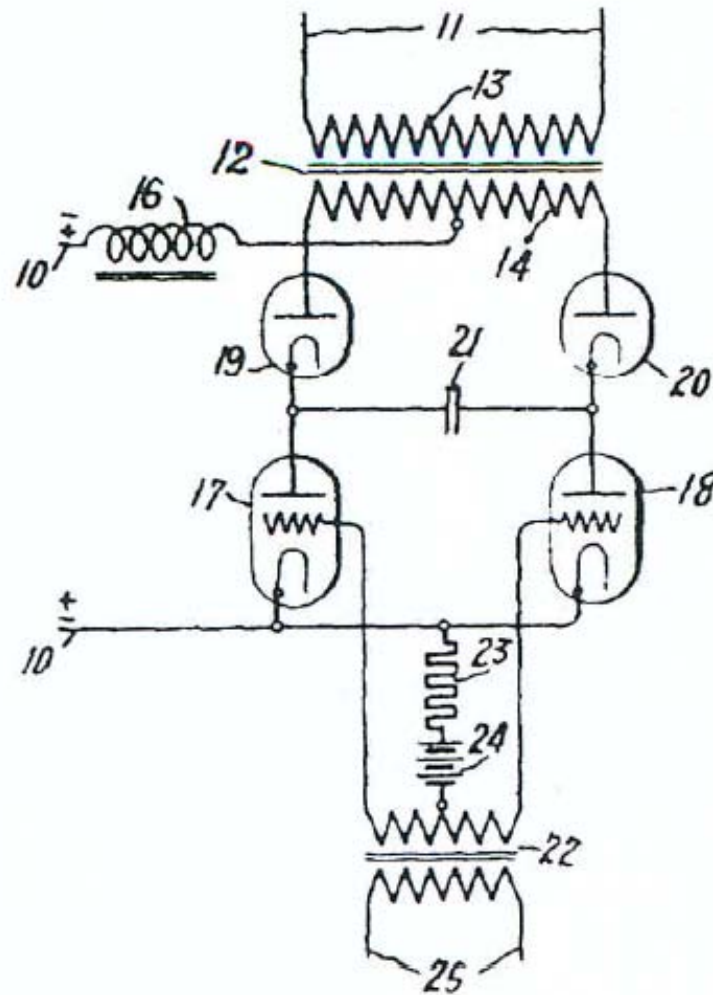
Y, para terminar, algo de Historia: Ayer y hoy de la  
Electrónica de Potencia



Oscilador electromecánico de Hertz (convertor DC-AC  
electromecánico).

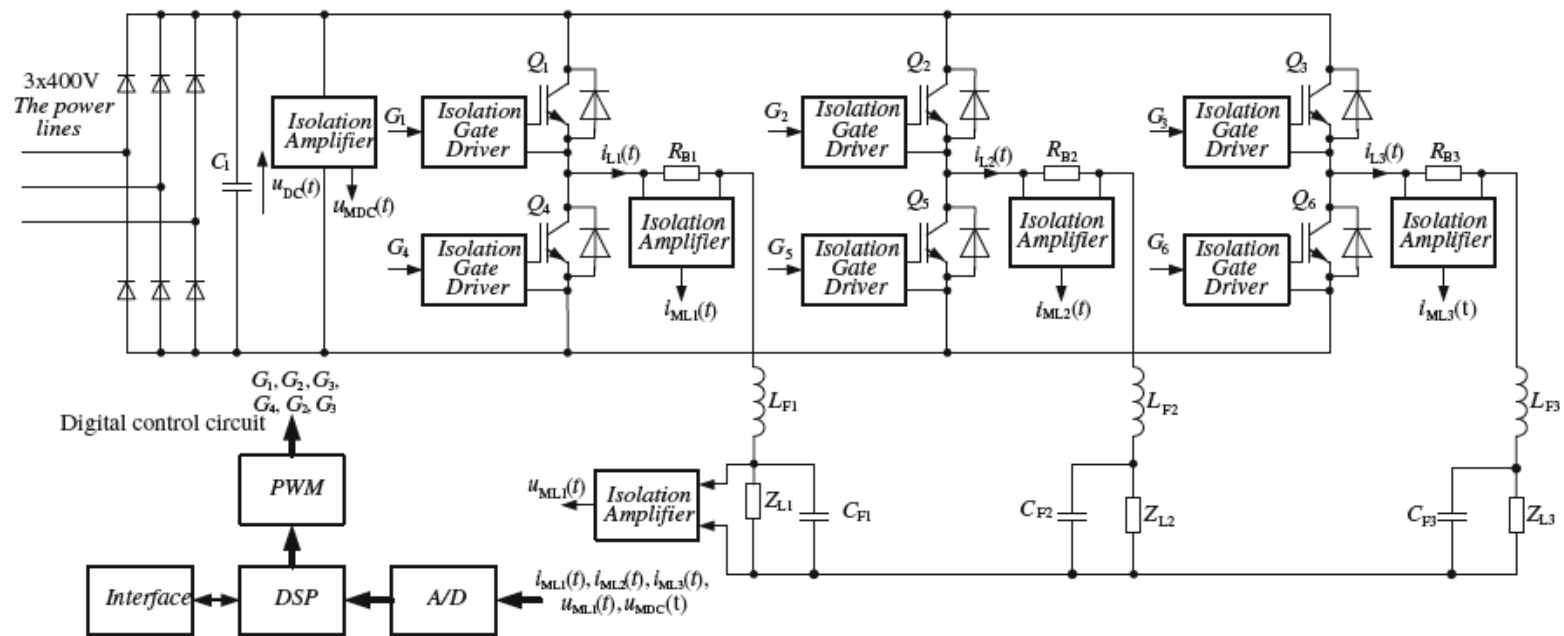


Conversor DC-DC mixto: electromecánico y con válvula termo-iónica (tubo de vacío), tomado de la patente original.



Conversor DC-AC auto-oscilante con tubos de vacío, (tomado de la patente original)

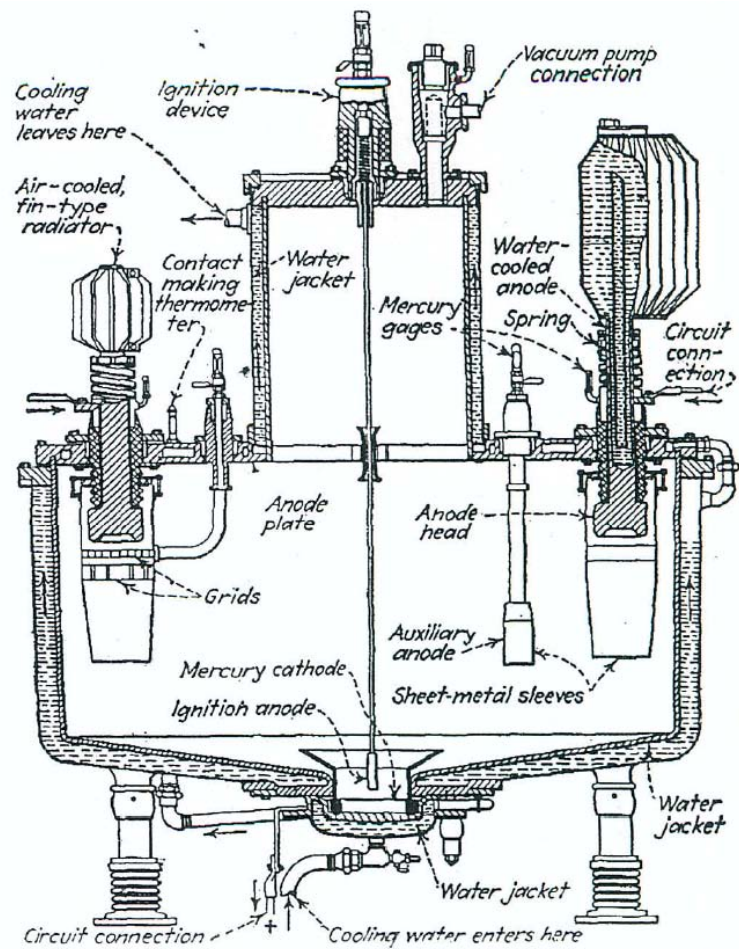




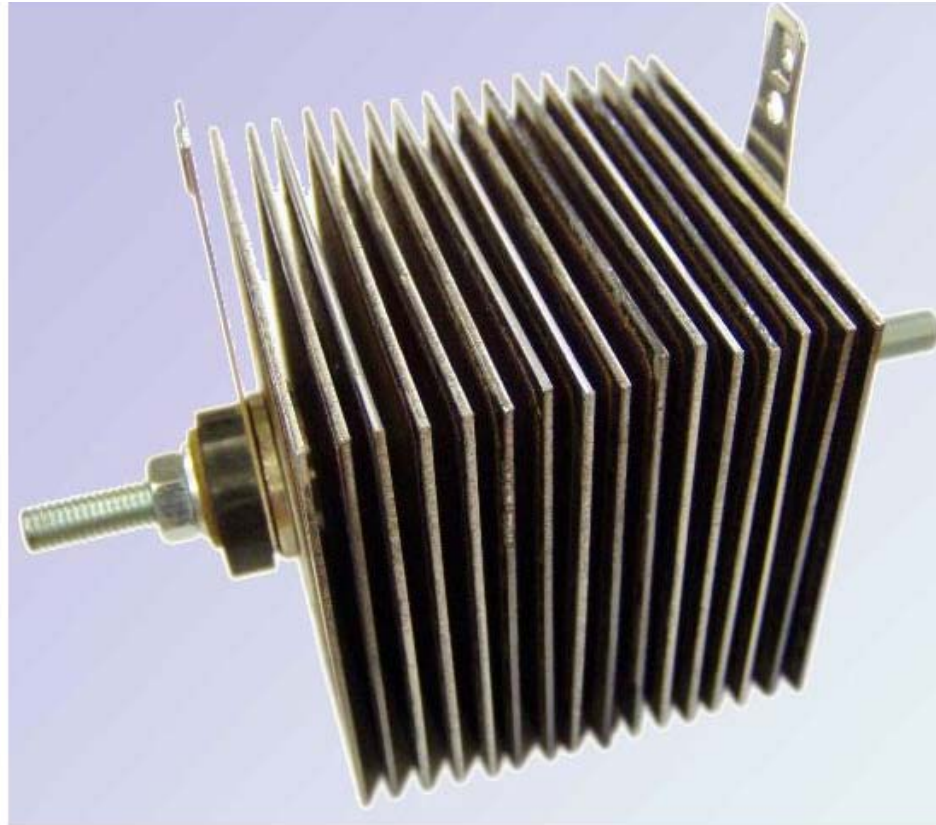
Conversor AC-DC-AC trifásico con dispositivos de control de potencia de estado sólido (IGBTs de Si) y control digital por DSP (tomado de la patente original).



Rectificador termo-iónico modelo RA 0007A.



Sección transversal de una válvula rectificadora (diodo) de vapor de mercurio (cortesía Allis-Chalmers)



**MATERIAL EMPLEADO**

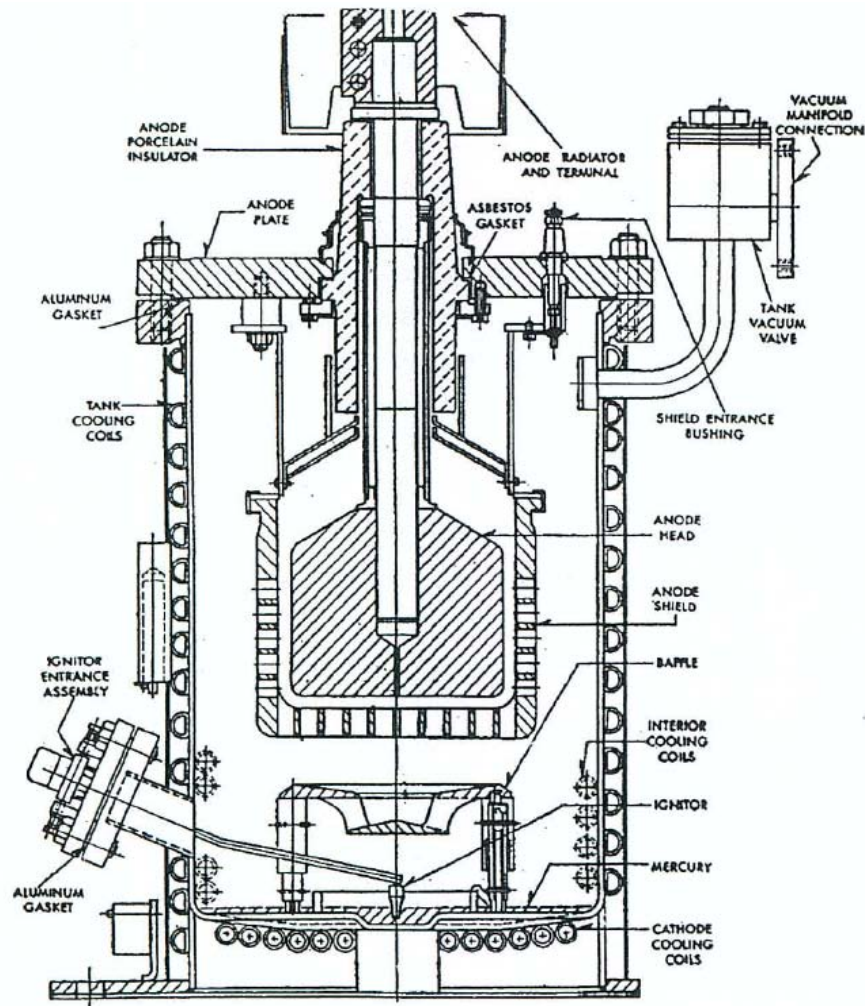
16 - PLACAS DE SELENIO 50x50mm A 25V  
MONTADO Y CONEXIONADO

Rectificador de estado sólido, tecnología de Selenio.



**RA20 2500A General Purpose Rectifier**  
2500 Amperes Average, 4200 Volts

Rectificador de estado sólido, tecnología de Silicio.

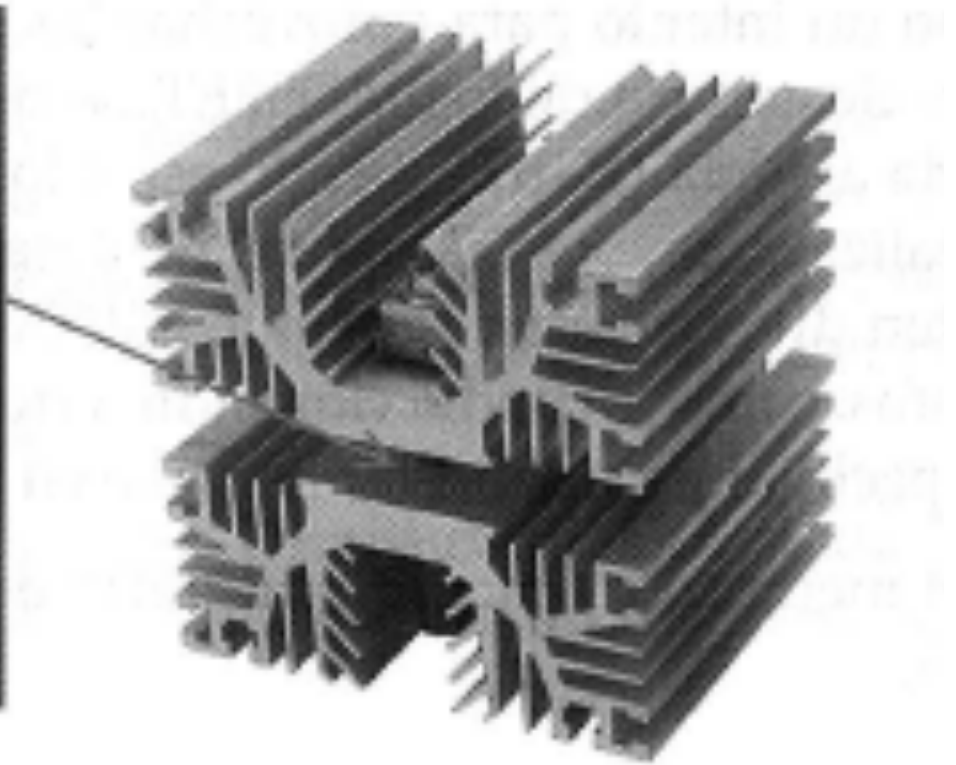


Corte transversal de un rectificador controlado de vapor de mercurio, tipo Ignitron (cortesía Westinghouse).



Rectificador controlado de Silicio (SCR) tipo T2871, tensión de bloqueo 8000V, corriente promedio 2600A a una temperatura de juntura de 85°; diámetro 172mm, alto 35,4mm.

(Cortesía Infineon)



SCR de 6,5kV y 1,5kA, 5,6cm de diámetro (izquierda) y el mismo dispositivo montado en su disipador de calor (derecha)





Rectificador termo-iónico por vapor de mercurio, arreglo conversor AC-DC dodecafásico en un solo "encapsulado" (cortesía Brown-Boveri)

**CM100RL-24NF**



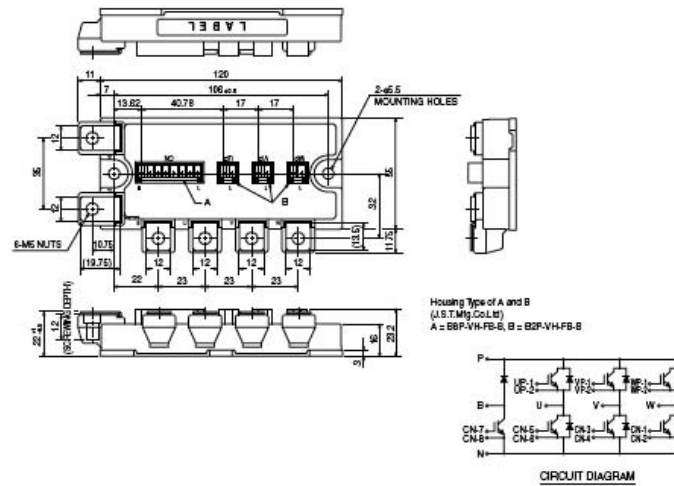
- IC ..... 100A
- VCES ..... 1200V
- Insulated Type
- 7-elements in a pack

**APPLICATION**

AC drive inverters & Servo controls, etc

**OUTLINE DRAWING & CIRCUIT DIAGRAM**

Dimensions in mm



Módulo inversor trifásico con IGBTs 100A, 1200V (cortesía MITSUBISHI).