

# Memorias del Encuentro Argentino de Ingeniería

- | Enseñanza de la Ingeniería-CAEDI
- | Gestión de la Educación en Ingeniería
- | Agrimensura, Geodesia y Ciencias de la tierra y el mar
- | Biotecnología y Bioingeniería
- | Materiales y Nanotecnología aplicada a los materiales
- | Desarrollo Tecnológico Social, Vinculación Universidad, Empresa y Estado
- | Ejercicio Profesional de la Ingeniería, Empresas y Servicios
- | Ferroviaria, Automotriz, Naval y Transporte
- | Alimentos y Agroindustria
- | Agronomía y Forestal
- | Energía, Energías Limpias, Energías Renovables y Eficiencia Energética
- | Ingeniería Sostenible, Gestión Ambiental y Cambio Climático
- | Innovación y Emprendedorismo en Ingeniería
- | Mujeres en Ingeniería y Cambio Social
- | Obras y Proyectos de Ingeniería, Infraestructura y Conservación del Patrimonio
- | Tecnología de la Información y Comunicación



**Memorias del Encuentro Argentino de Ingeniería : edición 2022 / José Basterra...**

[et al.] ; contribuciones de Carolina Orcola ; compilación de Martina Perduca ; prólogo de Nestor Braidot ; Jose Basterra. - 1a ed compendiada. - Corrientes : Universidad de la Cuenca del Plata. Secretaría de Políticas del Conocimiento, 2023.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-4050-08-3

1. Ingeniería. 2. Educación. I. Basterra, José, prolog. II. Orcola, Carolina, colab. III. Perduca, Martina, comp. IV. Braidot, Nestor, prolog.

CDD 620.007

ISBN 978-987-4050-08-3



## Título: “Diseño de un interruptor de potencia en CC basado en tecnología de nuevos materiales”

Apellido, Nombre: Sáez, Gabriel Edgardo

Filiación: Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura de la UNNE

e-mail: [ge\\_saez@hotmail.com](mailto:ge_saez@hotmail.com)

### Resumen

Las líneas de alta tensión en CC actualmente en servicio fueron diseñadas para la transmisión punto a punto. A diferencia de las redes de CA, existen dos fuertes limitaciones para el desarrollo de verdaderas redes de potencia en CC, a saber: la necesidad de instalar convertidoras en cada instalación donde se deba escalar la tensión, lo cual implica costos adicionales importantes en la obra, y la dificultad para contar con interruptores de potencia en CC que aislen fallas de un sector de la red, evitando que la misma afecte todo el sistema. El presente trabajo es un aporte para la solución del segundo inconveniente planteado, utilizando tecnología de nuevos materiales superconductores.

### Abstract

The DC power lines currently in service were designed for point-to-point transmission. Unlike AC networks, there are two strong limitations for the development of true DC power networks, namely: the need to install converters in each installation where the voltage must be scaled, which implies significant additional costs in the work, and the difficulty of having DC power switches that isolate faults from a sector of the network, preventing it from affecting the entire system. The present work is a contribution to the solution of the second problem raised, using technology of new superconducting materials.

**Palabras claves:** corriente continua; interruptor; superconductores.

### INTRODUCCIÓN

La expansión de las redes de Alta Tensión en Corriente Continua (ATCC [o HVDC por sus siglas en inglés]) se ven limitadas por los inconvenientes que se presentan para aislar la falla en una configuración ramificada, anillada o mallada, debido fundamentalmente a la complejidad que la interrupción de grandes corrientes en ATCC presentan a los tradicionales interruptores de contactos desplazables ante la no autoextinción del arco formado en el proceso de apertura, tal como ocurre en las redes de CA. Consecuencia de ello se han probado distintos diseños en los cuales lo que se busca es prescindir del arco, basado en electrónica de potencia (materiales semiconductores; [3]) o en el establecimiento de contracorrientes de magnitudes similares a las que se quiere interrumpir que permitan la apertura con bajos valores de corriente. No se evidencia que los mismos estén siendo usados masivamente; las líneas ATCC siguen siendo punto a punto; [4]-[8].

El presente es un aporte teórico de un diseño de interruptor de potencia en CC basado en la tecnología de los materiales superconductivos.

temperaturas inferiores a un valor crítico “ $T_c$ ”, cercana, relativamente hablando, a 0 K, cuyas manifestaciones más evidentes son la brusca disminución de la resistencia eléctrica a “0  $\Omega$ ” –estado superconductor de la corriente eléctrica– y su transformación en materiales diamagnéticos perfectos –repulsión total de campos magnéticos externos y expulsión del campo magnético propio–; [1], [2].

En estado superconductor el material puede perder estas cualidades por: a) La circulación de una corriente elevada que supere una determinada densidad de corriente crítica “ $J_c$ ” (depende entonces de la sección del conductor) y b) la aplicación de un campo magnético externo intenso que supere un cierto valor “ $H_c$ ”.

En consecuencia la superconductividad existe en una región determinada por la terna de valores de temperatura, densidad de corriente eléctrica e intensidad de campo magnético (externo), siendo constantes la composición química del elemento, la sección de conductor y la presión a la que está sometido.

### DESARROLLO

La superconductividad es una característica física que adquieren los materiales cuando son enfriados a

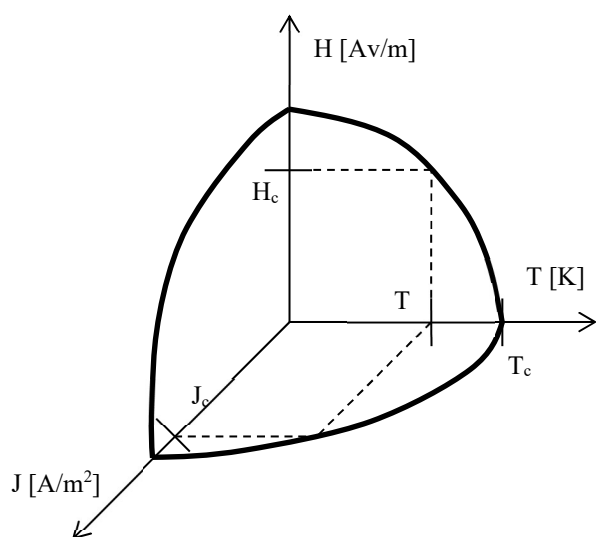


Figura 1: Región de superconductividad.

En la figura 1 podemos apreciar que para un determinado valor de " $T < T_c$ " existirán valores " $H_c$ " ( $J=0$ ) y " $J_c$ " ( $H=0$ ) los cuales, si son superados, sacan de la región de superconductividad al material, aun para temperaturas inferiores a " $T_c$ ".

Existen materiales, como el sulfuro de hidrógeno, materiales orgánicos y algunos de los compuestos cerámicos, que al salir de la zona de superconductividad son aislantes eléctricos (malos conductores de la electricidad).

La idea es entonces construir un ingenio que, conteniendo una ampolla de material a temperatura de superconductividad, pueda ser sacada de dicho estado por aplicación de una sobrecorriente o por aplicación de un intenso campo magnético externo o de ambos a la vez y que, fuera de la región de superconductividad, se comporte como un aislante eléctrico de elevada rigidez dieléctrica. Se propone en la figura 2 un artefacto de este tipo.

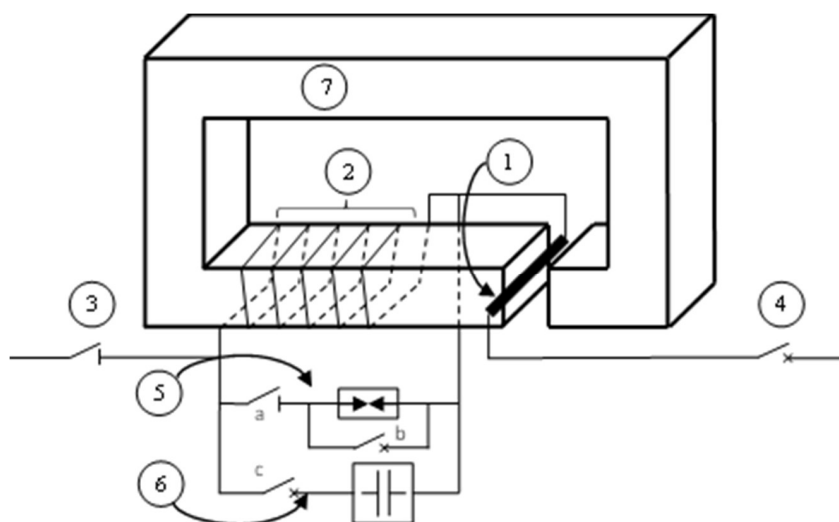


Figura 2: Interruptor de potencia en CC con ampolla superconductiva.

En la figura 2, (1) es el interruptor superconductivo formado por una "ampolla" de un material refrigerado a una temperatura " $T < T_c$ " constante, que fuera de la región superconductiva, se comporta como un aislante eléctrico. Estando el seccionador (3) y el interruptor (4) cerrados, por él circula la corriente " $I$ " del circuito principal externo al interruptor. Se encuentra alojado en el entrehierro del núcleo magnético (7).

El arrollamiento (2) es un bobinado de inducción arrollado sobre el núcleo magnético (7). Por él circula la misma corriente " $I$ " del interruptor superconductivo (1) estableciendo en el núcleo un campo magnético cuyo flujo " $\Phi$ " busca pasar a través del entrehierro y del interruptor (1). Para un valor de " $H_c$ " el campo penetrará el superconductor sacándolo de la región de superconductividad.

El seccionador (3) es un seccionador convencional para línea de ATCC. Su funcionalidad es aislar el campo de maniobra y protección y como todo seccionador opera sin carga.

El interruptor (4) es un interruptor convencional cuya funcionalidad es hacerlo funcionar como seccionador para aislar el campo –al igual que (3)– pero al cierre puede operar con carga (de allí que se lo considere interruptor). Como el estrés eléctrico de un interruptor es muy superior operando a la apertura que al cierre, y el interruptor (4) operará con carga solo al cierre (la apertura la hace el interruptor superconductivo (1)), en su diseño se puede obviar los condicionantes impuestos por el establecimiento de arcos eléctricos en la apertura, siendo por lo tanto su ingeniería más sencilla.

El circuito auxiliar (5) cuenta con un seccionador “a” y un interruptor “b” que pueden tener características similares a (4) y (5) respectivamente, y un descargador de sobretensión. El seccionador “a” se encuentra normalmente cerrado cuando opera el sistema con normalidad o en falla y solo se abre con la orden de “apertura” a discreción del interruptor superconductor (1) como se explicará en la descripción del circuito auxiliar (6). La funcionalidad del circuito auxiliar (5) radica en la necesidad de descargar el circuito magnético cuando se produce la “apertura” de (1) ante una falla; este evento provocará una sobretensión en extremos del bobinado inductor que cebará el descargador; para mantener el proceso de anulación del campo magnético inducido, el interruptor “b” cortocircuita el descargador para solucionar el inconveniente que el descebado ocurrido sin completar el proceso de anulación del campo magnético, provocaría en la bobina de inducción (2) (sobretensión y cortocircuito de la bobina).

El circuito auxiliar (6) es el circuito de disparo que opera el interruptor (1) como elemento de maniobra para provocar la apertura y está formado por un interruptor “c” (de características similares a (4)) y un banco de capacitores. Su funcionalidad es provocar una

sobrecorriente en el bobinado de inducción (2) del núcleo magnético (7) que incremente el campo magnético a valores iguales o superiores a “ $H_c$ ” en el entrehierro ocasionando la penetración del campo en el superconductor y la consecuente salida de la región de superconductividad. El circuito de disparo no altera la corriente externa “ $I$ ”. Como la corriente de descarga del banco de capacitores se suma a la corriente externa “ $I$ ” en el bobinado inductor (2) –se deberá tener en cuenta la polaridad del banco–, la corriente “ $I$ ” aumentará la sensibilidad del interruptor (1). Obsérvese que para evitar el eventual cebado del descargador del circuito auxiliar (5) en el proceso de apertura del interruptor (1), el seccionador “a” y el interruptor “c” deberán estar enclavados de forma tal que el cierre de “c” provoque la apertura de “a”

Tanto los circuitos auxiliares (5) y (6) deberán eventualmente incluir resistencias limitadoras o de amortiguamiento, respectivamente, que limiten la corriente en el circuito (5) y amortigüen evitando oscilaciones en el transitorio del circuito (6).

Analizaremos ahora el funcionamiento del interruptor en distintas circunstancias. Para ello presentaremos el esquema circuital del interruptor en régimen permanente de funcionamiento (Figura 3).

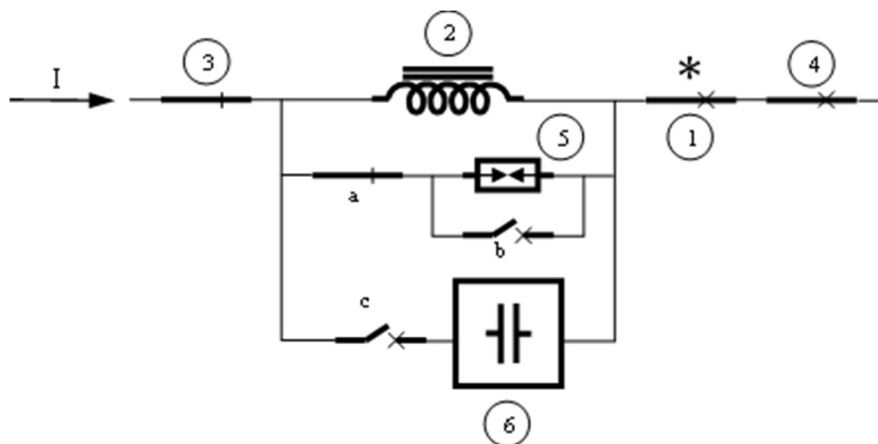


Figura 3: Esquema circuital.

En la figura 3 vemos que la corriente “ $I$ ” circula a través del seccionador (3), la inductancia “ $L$ ” del circuito de inducción (2), el interruptor superconductor (1) y el interruptor convencional (4). Graficando en un plano “ $H$ - $J$ ” (ver figura 1), a una temperatura constante “ $T < T_c$ ” el sistema opera en un punto cualquiera “o” –figura 4–.

Supongamos que la corriente “ $I$ ” se ha elevado a un valor “ $I_{cc}$ ” por una falla en el sistema de transporte en CC, lo cual ha llevado a alcanzar los valores críticos de “ $J_c$ ” y “ $H_c$ ” (Figura 1) provocando la apertura del interruptor superconductor (1) y la apertura del interruptor convencional 4 (sin carga, por la rapidez en

la actuación del interruptor superconductor); el descargador (5) se ha cebado y el interruptor “b” se cierra para mantener el proceso de caída del campo magnético remanente en el núcleo, cortocircuitando el descargador. Es dable esperar –y será materia de investigación– que en el proceso de apertura del interruptor superconductor, ocurrida por el restablecimiento de la cualidad aislante del material al salir de la región de superconductividad, la misma perdure mientras el potencial establecido entre sus bornes mantenga su valor provocando la circulación de las ínfimas corrientes de fuga que caracterizan a todo aislante y que, desaparecido este potencial por la

apertura del interruptor (4), automáticamente se restablezcan las cualidades superconductoras provocando su “cierre” y quedando predisposto para su entrada en servicio nuevamente, lo que ocurrirá por una orden de cierre del interruptor (4). De no ser así, eventualmente se podrían estudiar estrategias para sobreexcitar temporalmente el bobinado de inducción (2) para provocar valores superiores a “ $H_c$ ” que mantengan fuera de la región de superconductividad al material, como mínimo, mientras dure el proceso de apertura del interruptor (4). Es probable que el lector haya notado que se podría sacar de la región de superconductividad al interruptor superconductor operando exclusivamente sobre la densidad de corriente “ $J$ ”, ahorrándonos el circuito magnético y simplificando el interruptor, esto no se ha hecho particularmente por lo explicado en el párrafo anterior, por un lado, y porque la acción conjunta del incremento del campo magnético y de la densidad de corriente puede llevar a una actuación más rápida del interruptor, tal y como se aprecia en la Figura 4 que muestra la variación de “ $H$ ” y “ $J$ ” como consecuencia del cortocircuito y el desplazamiento del punto de operación “ $o$ ” al punto “ $o'$ ”.

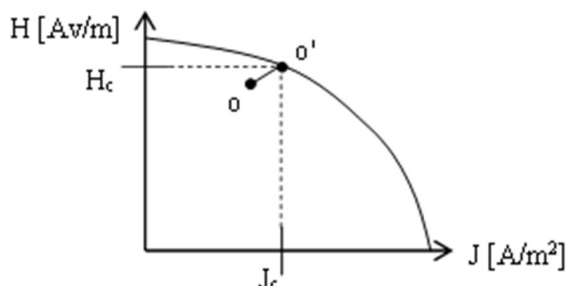


Figura 4: Paso de un régimen permanente  $O$  a otro en falla  $O'$  en el plano  $H$ - $J$ .

Ahora operemos a voluntad el interruptor superconductor como equipamiento de maniobra; en el circuito de la figura 3 cerramos el interruptor “ $c$ ” provocando una sobreexcitación del campo magnético elevando su valor por encima de “ $H_c$ ” lo que provocará la “apertura” del interruptor superconductor (1) y posteriormente la apertura del interruptor (4). También en este caso se podría prescindir del núcleo magnético haciendo actuar el interruptor superconductor (1) por una sobrecorriente generada por el banco de capacitores modificando el punto de conexión del banco a uno intermedio entre (3) y (4).

En el plano “ $H$ - $J$ ”, la operación del interruptor superconductor se representaría como lo indica la figura 5.

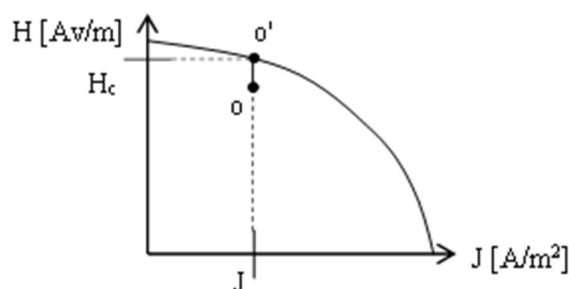


Figura 5: Operación del interruptor como equipamiento de maniobra.

En la figura 5 podemos apreciar que el sistema, operando en el punto “ $o$ ”, variará al punto “ $o'$ ” sin modificarse la densidad de corriente, mientras el campo magnético se incrementa hasta llegar a un nuevo valor crítico que provocará la “apertura” del interruptor superconductor.

En la posición invariable de predisposición al cierre la posición de los seccionadores e interruptores de la Figura 3 será la siguiente: el interruptor superconductor (1), en ausencia de corriente eléctrica y campo magnético que lo afecte, ha recuperado su estado de superconductividad en virtud de que su temperatura “ $T < T_c$ ” es invariable y por lo tanto a operado el “cierre” del mismo sin que se restablezca la conducción de corriente por estar (4) abierto. El cierre efectivo del circuito lo efectuará entonces el interruptor convencional (4). Se podría efectuar el cierre del circuito directamente con el interruptor superconductor (1) manteniendo valores de corriente y campo que lo mantengan fuera de la región superconductiva y extinguiendo los mismos a voluntad, pero como estas magnitudes se presuponen elevadas, podría resultar poco conveniente para el volumen de la instalación.

Por último veamos como operamos los interruptores y seccionadores para predisponer el interruptor para su mantenimiento y reparación. En la Figura 3, estando el interruptor predisposto al cierre, se opera la apertura del seccionador (3) quedando el campo aislado y disponible para su mantenimiento.

Una forma de abrir el interruptor superconductor para el caso en que algunos de los elementos que componen el circuito falle e impida su operación consistirá en elevar aceleradamente la temperatura hasta sacarlo de la región de superconductividad, cosa que ocurrirá para cualquier valor “ $T > T_c$ ”, o sea, no es necesario sobrecalentar el interruptor más allá de este límite.

Un interruptor de este tipo tendrá ventajas y desventajas asociadas. Veamos las desventajas: la instalación criogénica necesaria para mantener las bajas temperaturas requeridas en el interruptor



superconductor ocuparán espacio y consumirán energía obligando a incrementar la potencia de los servicios auxiliares.

El volumen y superficie requeridos serán claramente superiores a los de un campo convencional de CA del tipo seccionador-interruptor-seccionador, pero en CC solo necesitaremos de dos de estos elementos (uno por polo en la transmisión de dos pares de polos) en los cuales además, el fluido refrigerante para ambos polos puede ser producido por una sola instalación. No se espera entonces que el espacio requerido sea muy superior al de un campo convencional de CA. Para comparar, los equipos de resonancia nuclear magnética funcionan con imanes superconductores y es dable esperar un volumen equivalente para el interruptor superconductor más la instalación criogénica.

En cuanto al consumo de energía, esta será superior a los bajos requisitos de un campo convencional de CA, prácticamente insignificantes en la mayor parte del tiempo en que no operan, debido a la necesidad de mantener enfriado el líquido refrigerante (nitrógeno líquido el más recomendable por su relativamente fácil obtención). Las pérdidas técnicas se incrementarán sensiblemente.

Por el lado de las ventajas debemos considerar que el interruptor superconductor se instalará en una estación transformadora y/o de maniobra donde concurrirán las

tecnologías de CA y CC, en vista de que será necesario prever la instalación de una planta criogénica, se puede transformar las desventajas citadas en el punto anterior en ventajas. Por ejemplo, una de las aplicaciones sobre las que más se ha publicado es la del transformador sin pérdidas a partir de bobinas superconductoras. Otra aplicación es la del conductor criogénico, que se podría aplicar a los conductores de enlace, generalmente tendidos subterráneos a las redes externas de la estación transformadora. Finalmente, asociar las TICs y sus centros de cómputos a estaciones transformadoras, es una tendencia y en las mismas las supercomputadoras cuánticas podrían jugar un papel fundamental. Finalmente la electrónica de potencia asociada a la instalación para la conversión CA-CC sería muy beneficiada con la posibilidad de instalar superconductores electrónicos.

## CONCLUSIONES

Considero que el ingenio planteado es un aporte relevante para la obtención de interruptores de potencia en ATCC. La figura 6-a es un gráfico unifilar de lo que actualmente son las líneas ATCC, mientras que la 6-b representa el futuro, de implementarse en forma práctica los interruptores de potencia en ATCC

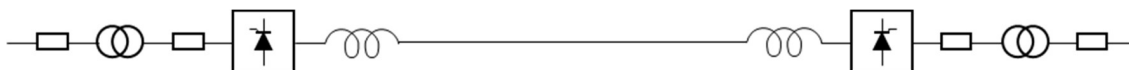


Figura 6-a: Configuración actual "punto a punto" de las líneas ATCC.

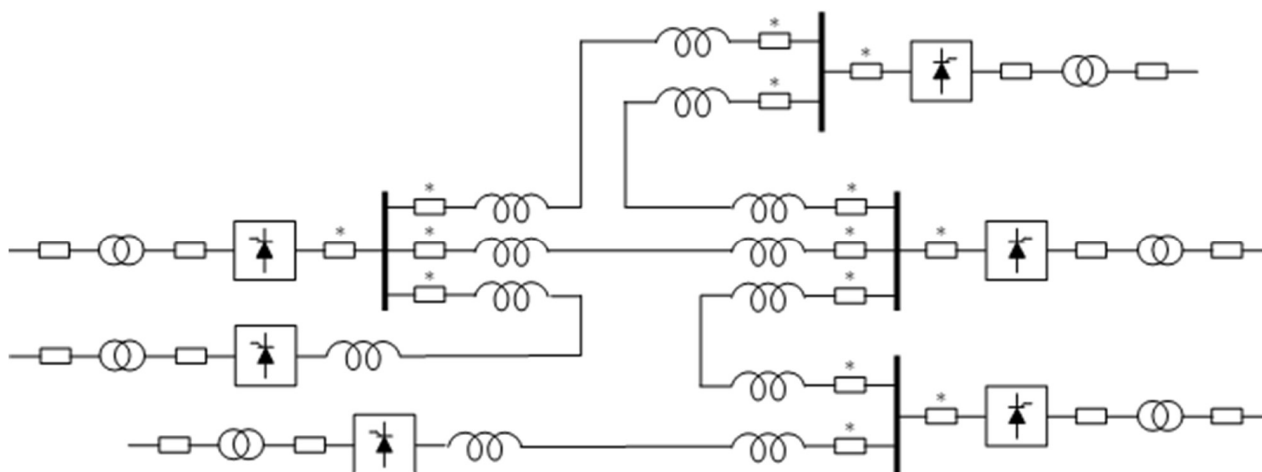


Figura 6-b: Configuración futura de una red en ATCC con interruptores superconductivos.

El trabajo realizado es un ejemplo de como los conocimientos de un área de la ciencia impactan en otra generando alternativas tecnológicas nuevas para cubrir una demanda real.

Observe el lector que el principio de funcionamiento bien puede aplicarse no solo para circuitos de CC, sino también para los de CA para los cuales se deberán introducir eventualmente modificaciones en el diseño

por el carácter alterno de los parámetros, siendo esto materia de otro estudio. De ser así estaríamos hablando de interruptores superconductivos universales.

Las instalaciones criogénicas asociadas a estaciones transformadoras para atender los requerimientos de los interruptores superconductivos son aprovechables para otras aplicaciones ya planteadas y en estudio. Nace así un nuevo concepto para estas instalaciones que me atrevo a bautizar con el nombre de “Estaciones Transformadoras frías”.

## AGRADECIMIENTOS

A mis profesores de posgrado de la Especialización en Energía eléctrica –UTN Santa Fe–, Dra. Sandra M. Mendoza y Dr. Germán G. Oggier por los conocimientos brindados con tanto entusiasmo.

## REFERENCIAS

### Artículos en publicaciones periódicas:

- [1] Luis Antonio Pérez, (2012). Los primeros cien años de la superconductividad. *Materiales Avanzados*, num. 18. pgs. 43-48.
- [2] Francisco Morales Leal, (2011). Superconductividad y magnetismo. *Materiales Avanzados*, num. 26. pgs. 26-30.

### Monografías:

- [3] Jared Candelaria y Jae-Do Park. (2011). *VSC-HVDC System Protection: A Review of Current Methods*. IEEE, EEUU.

### Libros:

- [4] Vijay K. Sood, (2004). *HVDC and FACTS Controllers*. 1° edición; Kluwer Academic Publishers. Nueva York, Boston, Dordrecht, Londres, Moscú.
- [5] Muhammad H. Rashid, (2018). *Power Electronics Handbook*. 4° edición; Elsevier B-H editores. Oxford, Cambridge.
- [6] Dirk Van Hertem, Oriol Gomis-Bellmunt y Jun Liang, (2016). *HVDC Grids For Offshore and Supergrid of the Future*. 1° edición; IEEE Press & Wiley. Hoboken-New Jersey, Mississauga-Ontario.
- [7] J. Arrillaga, Y. H. Liu y N. R. Watson, (2007). *Flexible Power Transmission*. 1° edición; Wiley. Hoboken, San Francisco, Weinheim, Milton, Singapur, Mississauga.
- [8] Enrique Ras, (1975). *Teoría de líneas Eléctricas; de potencia; de comunicación; para transmisión en continua*; Marcombo. Barcelona.