



CONVERSIÓN DE ENERXÍA ELÉCTRICA E ELECTRÓNICA DE POTENCIA

Jesús Doval Gandoy

Discurso de ingreso na Real Academia de Ciencias de Galicia

Santiago de Compostela, 3 de abril de 2025

Limiar.

1. Electrónica de potencia. Definición.
2. Conversión de enerxía eléctrica.
3. Tubos electrónicos. A orixe da electrónica de potencia.
4. Dispositivos electrónicos de potencia semicondutores.
5. Electrónica de potencia. Tecnoloxía transversal e interdisciplinar.
6. Formación no campo da electrónica de potencia.
7. Epílogo.

Referencias.

Sr. Presidente da Real Academia Galega de Ciencias.
Sras. e Sres. Académicos.
Sras. e Sres. Representantes das Universidades.
Autoridades.
Señoras e Señores.

LIMIAR

Quero iniciar a miña intervención con palabras de agradecemento ao Presidente e aos Académicos da Real Academia Galega de Ciencias por este recoñecemento á miña actividade profesional e pola oportunidade que me ofrecen ao propoñer e apoiar o meu ingreso como Académico Numerario desta Institución. Grazas aos Académicos que avalaron persoalmente o meu nomeamento, e moi especialmente ao Académico Numerario Pedro Merino, que tamén se ofreceu a pronunciar o discurso laudatorio.

Este nomeamento é para min unha gran honra. Aínda que inesperado, o agradezo de xeito especial e comprométome a participar nas actividades da Academia.

Non me cabe dúbida de que os logros acadados que fixeron que fora elixido para formar parte de esta institución son debidos, de un xeito ou outro, ao apoio e colaboración de moitas persoas que xogaron un papel fundamental na miña evolución como persoa e na miña traxectoria profesional. Quero resaltar e agradecer o apoio da miña familia, membros do grupo de investigación, estudantes de doutoramento, compañeiros tanto da Universidade de Vigo como de outras entidades, profesores, alumnos titorizados e persoal de apoio nas actividades desenvoltas.

Neste discurso de ingreso falarei sobre a tecnoloxía coa que está relacionada a miña actividade dos últimos anos. En concreto, presentarei o potencial e función da electrónica de potencia na conversión da enerxía eléctrica. Iniciarei a presentación definindo a electrónica de potencia, para continuar con unha revisión histórica da conversión de enerxía eléctrica e como a electrónica de potencia se converteu nunha tecnoloxía nuclear da conversión de enerxía eléctrica.

1. ELECTRÓNICA DE POTENCIA. DEFINICIÓN

A electrónica de potencia é a rama da electrónica que estuda a conversión de enerxía eléctrica mediante o uso de dispositivos electrónicos. Permite a xestión do fluxo de enerxía eléctrica de xeito eficiente e fiable entre fontes e cargas de diferente natureza. Na actualidade, a electrónica de potencia é parte nuclear na maioría de procesos nos que hai unha transformación de enerxía eléctrica. Estímase que no ano 2030, o oitenta por cento da enerxía eléctrica consumida será procesada por medio da electrónica de potencia.

2. CONVERSIÓN DE ENERXÍA ELÉCTRICA.

A necesidade de converter enerxía eléctrica aparece no século XIX en paralelo co desenvolvemento dos primeiros sistemas de xeración, transporte, distribución e consumo de enerxía eléctrica. Durante a coñecida como Segunda Revolución Industrial, houbo grandes avances e descubrimentos en diversos campos. En concreto, a electricidade tomou moita importancia en moitas aplicacións de iluminación, industria, minería, transporte, etc. O incremento no consumo de electricidade motivou a instalación de centrais de xeración de enerxía eléctrica para cubrir a demanda crecente. O desenvolvemento de tecnoloxías de sistemas eléctricos de diferente nivel de potencia, voltaxe e frecuencia abría diferentes posibilidades tecnolóxicas. Ante as expectativas de grandes beneficios, deseguida se desencadeou unha competencia entre grandes compañías, que desembocaría na coñecida como guerra das correntes, que enfrontou a Thomas Edison e a súa compañía con Nicola Tesla e a compañía Westinghouse Electric. Thomas Edison defendía as tecnoloxías baseadas en corrente continua [1], pola contra, Nicola Tesla desenvolveu xeradores e motores eléctricos de corrente alterna. As tecnoloxías que utilizaban corrente alterna axiña foron as tecnoloxías elixidas nos sistemas de xeración e transporte de enerxía eléctrica [2]. A facilidade para elevar e reducir voltaxes de corrente alterna, fronte ás dificultades que tiña facelo en corrente continua, permitía transportar enerxía eléctrica a maior distancia con maior eficiencia e menor custo.

Na últimas décadas do século XIX e primeiras décadas do século XX desenvóléronse e puxéronse en servizo sistemas eléctricos de diferentes niveis de voltaxe e frecuencia, isto obrigou a desenvolver tecnoloxías e sistemas de conversión para poder conectalos. Algunhas das tecnoloxías de conversión de enerxía eléctrica utilizadas fai máis de cen anos seguen a ser utilizadas a día de hoxe, outras cambiaron de xeito radical.

Un exemplo de tecnoloxía que se mantén despois de máis de un século é a dos transformadores eléctricos [2], utilizados en aplicacións de corrente alterna nas que é necesario mudar o nivel de voltaxe, elevando ou reducindo a voltaxe de saída con respecto á de entrada, mentres que o valor de frecuencia non cambia. A día de

hoxe, os transformadores eléctricos utilízanse en todos os niveis de potencia e frecuencia e en diferentes puntos do sistema de xeración, transporte, distribución e consumo da enerxía eléctrica.

Noutros casos, a tecnoloxía de conversión mudou de xeito radical; un exemplo é o dos automóviles eléctricos. A electrificación do automóbil tomou un gran impulso ao longo do século XXI, pero xa na primeira década do século XX o trinta e oito por cento dos automóviles que circulaban polas estradas e rúas de Norte América eran propulsados por electricidade [3, 4]. A medida que avanzou o século XX, estes automóviles perderon mercado fronte aos de gasolina ou diésel, quedando relegado o seu uso como vehículos profesionais. Estes vehículos incorporaban tecnoloxías moi básicas para axustar a voltaxe aplicada ao motor de tracción de corrente continua a partires da voltaxe da batería. En moitos casos, a voltaxe axustábase intercalando por pasos ou chanzos unha resistencia en serie, o que redundaba nun sistema de baixo rendemento xa que, baixo determinados modos de operación, unha gran parte da enerxía aportada pola batería disipábase na resistencia.

En aplicacións onde era necesario conectar dous sistemas eléctricos de corrente alterna de diferente frecuencia, ou conectar sistemas eléctricos de corrente alterna e corrente continua, utilizábanse convertedores rotatorios, dinámicos ou electromecánicos [5], que aínda que caeron en desuso na maioría de aplicacións, aínda se utilizan a día de hoxe. Estes convertedores electromecánicos, baseados na conexión mecánica de máquinas eléctricas de diferentes características, foron moi utilizados nos tranvías eléctricos de finais do século XIX e principios do século XX [6]. Os convertedores rotatorios permitían a conexión da liña de subministro ao tranvía, que era de corrente continua, dende a rede de distribución de corrente alterna. En aplicacións mineiras foron usados para converter a enerxía eléctrica de corrente alterna en corrente continua, utilizada para accionar os motores dos elevadores de material. Algunhas aplicacións industriais, como os procesos electroquímicos de electro-deposición, utilizan corrente continua de valor elevado, que nesta época era convertida dende a rede de alterna por medio de convertedores rotatorios [7]. Noutras aplicacións industriais, como fábricas de papel, industria metalúrxica, téxtil ou imprentas, a maioría da maquinaria e equipos utilizaban motores de corrente continua, e era necesario controlar a velocidade dos motores da liña con precisión para evitar discontinuidades e rotura de material [8]. Neste sentido, un dos sistemas máis usado para a regulación de velocidade e sentido de xiro dos motores de corrente continua foi o sistema Ward-Leonard [9], sistema que foi usado durante gran parte do século XX en aplicacións moi diversas [10], que van dende grúas e cabrestantes navais ata sistemas de refrixeración en centrais nucleares.

Os convertedores dinámicos tamén foron utilizados para elevar a voltaxe en aplicacións de corrente continua; un exemplo pódese atopar nas aplicacións de radio, tanto en instalacións de terra [11, 12] como instalacións embarcadas en barcos [13] ou en avións [14], nas que o grupo motor-xerador elevaba a voltaxe de

corrente continua de aproximadamente vinte e catro volts ate os cinco centos volts de corrente continua, necesarios para o transmisor de radio.

3. TUBOS ELECTRÓNICOS. A ORIXE DA ELECTRÓNICA DE POTENCIA

Ao mesmo tempo que eran usados os convertedores rotatorios desenvolveuse a tecnoloxía que permitiría converter a enerxía eléctrica por medio de dispositivos electrónicos. As tecnoloxías de conversión de enerxía eléctrica baseadas en electrónica de potencia naceron e evolucionaron a medida que evolucionaron os dispositivos electrónicos de potencia. En concreto, en paralelo có desenvolvemento dos tubos de baleiro, orientados a aplicacións electrónicas de baixa potencia e alta frecuencia, desenvolvéronse os tubos de gas de baixa presión, en concreto de vapor de mercurio de baixa presión, que estaban orientados a ser usados en aplicacións de alta potencia e baixa frecuencia.

A invención do rectificador de arco de mercurio no ano 1902 [15] marcou un fito na historia de electrónica de potencia, xa que trouxo unha solución viable para converter corrente alterna en corrente continua. En poucos anos foi unha alternativa aos convertedores rotatorios da época [16,17]. O rectificador de vapor de mercurio foi usado durante a primeira metade do século XX en aplicacións de alta potencia nas que era necesario realizar a conversión de corrente alterna en corrente continua. En concreto, tivo un gran impacto nos sistemas de subministro eléctrico ás liñas de corrente continua dos tranvías [18].

Durante a primeira metade do século XX a tecnoloxía dos tubos electrónicos evolucionou de xeito importante, e desenvolvéronse diferentes dispositivos entre os que destacaron o ignitrón [19] e o tiratrón [20, 21]. Estes dispositivos podían manexar correntes e voltaxes elevados que permitiron o desenvolvemento de convertedores electrónicos de gran potencia. En concreto, o ignitrón foi desenvolto e comercializado por Westinghouse nos anos trinta. O ignitrón foi usado en equipos de soldadura por resistencia e en instalacións industriais nas que era necesario converter miles de amperes de corrente alterna en corrente continua, como en procesos electrolíticos usados na produción de aluminio, magnesio e outros metais [17]. O tiratrón foi desenvolto nos anos vinte e trinta a partir dos tubos de baleiro pola compañía General Electric [21].

Os tubos electrónicos, dos que houbo múltiples versións de diferente nivel de voltaxe e corrente, abriron un novo campo de aplicacións na conversión de enerxía eléctrica de alta potencia debido á súas boas prestacións para traballar en conmutación. Durante a fase de condución podían manexar correntes elevadas con baixa caída de tensión, e durante a fase de non condución podían bloquear voltaxes elevados. Ademais, podían ser fabricados en tamaños comparables aos dos tubos de baleiro que manexaban potencias moito máis reducidas [20].

A finais dos anos trinta, os tubos electrónicos empezaron a ser usados en aplicacións de transporte de corrente continua de alto voltaxe, aplicacións coñecidas polo acrónimo HVDC. Cando a voltaxe de corrente continua é suficientemente alta, o transporte de enerxía eléctrica de corrente continua en distancias longas, pode ser máis eficiente que o de corrente alterna.

No ano 1939, o Dr. Uno Lamm enxeñeiro da compañía ASEA Brown-Boveri, desenvolveu un tubo de gas que podía traballar con voltaxes de decenas de quilovolts fronte aos aproximadamente dous quilovolts que manexaban os tubos da época [22]. A evolución desta tecnoloxía permitiu poñer en servizo no ano 1954 a primeira liña de transporte de enerxía eléctrica de corrente continua e alta tensión baseada en tubos de gas [23]. A liña estaba localizada en Suecia, tiña una distancia de noventa e seis quilómetros, utilizaba un voltaxe de continua de cen mil volts, e tiña unha potencia nominal de vinte megawatts. Durante os anos 60 instaláronse múltiples liñas de transporte en continua de máis potencia e voltaxe, todas elas con tubos de gas. En concreto, no ano 1970 en Estados Unidos entrou en servizo a última liña de transporte en continua que utilizaba convertedores con tubos de vapor de mercurio, unha liña de mil catrocentos megawatts e tensión bipolar de catrocentos mil volts [22].

4. DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA SEMICONDUCTORES

Ao longo da década dos anos cincuenta desenvóléronse as primeiras versións comerciais de dispositivos semicondutores de potencia. En concreto, no ano 1958 comercializouse por primeira vez o rectificador controlado de silicio, tamén coñecido como tiristor ou polas siglas SCR [24]. Moitos autores consideran que a comercialización do tiristor marca o inicio da historia da electrónica de potencia baseada en dispositivos semicondutores. As diferentes versións de dispositivos semicondutores desenvoltas durante as seguintes décadas foron progresivamente substituíndo aos tubos de gas en diversas aplicacións [25]. A transición de tubos de gas a dispositivos semicondutores permitiu desenvolver sistemas de conversión máis fiables, de menor custo e de mellor rendemento.

Ao longo das décadas dos anos sesenta e setenta do século XX comercializáronse versións melloradas do tiristor, do transistor bipolar (BJT), do transistor MOSFET e do tiristor con apagado por porta (GTO). Estes dispositivos foron amplamente utilizados en fontes de alimentación e en accionamentos de motores eléctricos de velocidade variable. Xa nas últimas décadas do século XX desenvóléronse novas variantes do GTO como o ETO ou o IGCT [26].

A comercialización, nos anos oitenta, do transistor de potencia de efecto de campo de metal óxido semiconductor (MOSFET) desprazou ao transistor bipolar en moitas aplicacións de baixa potencia, principalmente polo seu mellor comportamento dinámico, mellor rendemento e por ter un circuíto de control máis sinxelo [27]. A

finais dos anos setenta e nos primeiros anos oitenta fíxose un gran esforzo investigador e de desenvolvemento na procura de un dispositivo transistor que combinase as bondades do transistor MOSFET e as do BJT da época. O transistor MOSFET tiña moi boas prestacións dinámicas e o seu control era sinxelo, pero só se podía utilizar en aplicacións de baixa potencia, para aplicacións de maior potencia era preciso utilizar transistores bipolares ou tiristores pero con frecuencias de traballo moi inferiores. Este esforzo deu froitos a principios dos anos oitenta, nos que un grupo de enxeñeiros de General Electric, dirixido por Jayant Baliga, desenvolveu a primeira versión do transistor bipolar de porta illada, tamén coñecido polas siglas IGBT [28]. Transistor que durante os últimos corenta anos foi o dispositivo máis utilizado en aplicacións de conversión de enerxía eléctrica que van dende as decenas de quilowatts ate as decenas de megawatts. En concreto, nos últimos anos substituíu gradualmente ao GTO en aplicacións de alta potencia, e nalgúns aplicacións de moi alta potencia é un competidor directo dos dispositivos IGCT [29].

Este gran esforzo en investigación e desenvolvemento feito durante as últimas décadas redundou na mellora das prestacións dos dispositivos semicondutores de potencia. A mellora de prestacións materializouse no incremento da voltaxe de bloqueo durante o estado de apagado, da intensidade de corrente durante o estado de conduction, da frecuencia de conmutación e da temperatura de operación, así como da redución de perdas durante a conduction e a conmutación. Na procura de dispositivos con estas características melloradas, desenvolvéronse e comercializáronse dispositivos electrónicos baseados en materiais de banda prohibida ancha (WBG), entre os que destacan o carburo de silicio (SiC) e o nitruro de Galio (GaN) [30]. En concreto, espérase que en breve se comercialicen dispositivos SiC de aproximadamente o mesmo tamaño que os de silicio pero con voltaxe de bloqueo moi superior. Por outra banda, estes materiais teñen unha condutividade térmica moito maior que os de silicio, o que facilita a súa utilización en aplicacións de alta densidade de potencia [30].

Na actualidade, e có fin de incrementar a densidade de potencia, os convertedores electrónicos traballan con frecuencias de conmutación elevadas. Este incremento da frecuencia de conmutación fai que se incrementen as perdas en conmutación, valor que está limitado polas perdas máximas que son admisibles, e en moitos casos pola relación entre as perdas de conmutación e as de conduction. Habitualmente, os dispositivos que manexan voltaxes e correntes de maior valor traballan con menor frecuencia, mentres que os dispositivos de menor potencia poden conmutar con maior frecuencia. En concreto, os tiristores son os dispositivos que manexan maior potencia e normalmente traballan con frecuencias por baixo dos cen hertz. Os dispositivos GTO, IGCT, ETO ou IGBT que son usados en aplicacións de alta potencia conmutan con frecuencias que poden chegar a ser de uns cantos centos de hertz. En aplicacións de potencias medias, como xeración de enerxía eléctrica fotovoltaica , eólica ou en accionamentos con motores eléctricos,

nas que o transistor IGBT é o dispositivo máis usado, as frecuencias de conmutación típicas poden variar entre os mil e os vinte mil hertz, dependendo da potencia e da aplicación. En aplicacións de baixa potencia e alta frecuencia o transistor MOSFET segue a ser o líder indiscutíbel. É esperable que nos vindeiros anos as novas tecnoloxías de dispositivos semicondutores se impoñan progresivamente na procura de sistemas de conversión de maior densidade de potencia, rendemento e fiabilidade [30].

5. ELECTRÓNICA DE POTENCIA. TECNOLOXÍA TRANSVERSAL E INTERDISCIPLINAR

Nos seus orixes a electrónica de potencia era unha tecnoloxía ligada maioritariamente a aplicacións de conversión de enerxía eléctrica de potencia elevada. Polo contrario, na actualidade, os sistemas de conversión de enerxía eléctrica baseados en electrónica de potencia poden ser atopados nunha gran variedade de aplicacións e niveis de potencia.

Un exemplo de conversión de enerxía eléctrica de baixa potencia pódese atopar en sistemas de alimentación de implantes electrónicos no corpo humano ou en colleitadores de enerxía do ambiente, que poden consumir una potencia de unhas decenas ou centenas de miliwatts. No rango de decenas e centenas de watts pódense atopar convertedores electrónicos de potencia en equipos domésticos e de iluminación con tecnoloxía LED. No campo da iluminación tradicional, era menos habitual a utilización de electrónica de potencia. No rango de potencias de varios quilowatts, a electrónica de potencia está presente nun gran número de aplicacións, como os sistemas de alimentación ininterrompida ou as fontes de alimentación de equipos de telecomunicacións entre outros. Na industria pódense atopar sistemas electrónicos de potencia en aplicacións moi variadas e nun rango de potencia moi amplo. En aplicacións mineiras os convertedores electrónicos de potencia están presentes dende a extracción ate o procesado do material. Unha das aplicacións da electrónica de potencia que maior repercusión mediática tivo nos últimos anos está relacionada co transporte e a mobilidade eléctrica, tanto en vehículos terrestres, mariños ou en aeronáutica. Nestas aplicacións se utilizan convertedores electrónicos de potencia que van dende as decenas ás centenas de megawatts. A electrónica de potencia está presente nas centros de xeración de enerxía eléctrica, principalmente en sistemas de enerxías renovables. Finalmente, as aplicacións de maior potencia nas que podemos atopar convertedores electrónicos de potencia son aquelas ligadas ao transporte de corrente continua en alto voltaxe, que evolucionaron dende as primeiras instalacións baseadas en tubos de mercurio de baixa presión, ás actuais instalacións baseadas en convertedores multi-modulares compostos por centenas de transistores IGBT.

A electrónica de potencia actual é unha tecnoloxía na que están involucradas diversas disciplinas da química, da física e das matemáticas. O deseño e

desenvolvemento de sistemas electrónicos de potencia necesita de equipos de persoas que manexen conceptos de disciplinas variadas, entre as que se destacan as seguintes:

- Electricidade, máquinas eléctricas, teoría de circuítos e electrotecnia, que rexen o funcionamento dos sistemas eléctricos cós que interaccionan os convertedores de potencia.
- Física de estado sólido, que explica o funcionamento dos dispositivos semicondutores.
- Electromagnetismo, que aborda a interacción entre campos eléctricos e magnéticos.
- Termotecnia, que aplica os principios da termodinámica para o control de temperatura do sistema electrónico.
- Teoría de control, sistemas dinámicos, sistemas discretos, técnicas de procesado dixital de sinais e as ferramentas matemáticas asociadas con estas disciplinas.
- Algorítmica e programación.
- Electrónica analóxica, dixital, sensores, circuítos de acondicionamento de sinal, e microprocesadores, tecnoloxías que permiten a implementación física dos algoritmos de control e a medida de variables.

6. FORMACIÓN NO CAMPO DA ELECTRÓNICA DE POTENCIA

Un aspecto de gran importancia relacionado con calquera ciencia ou tecnoloxía é a formación dos estudantes que serán os futuros profesionais. A día de hoxe hai diversos sectores industriais que demandan especialistas en electrónica de potencia e teñen dificultades para atopar o persoal coa cualificación requirida.

Nun estudo publicado recentemente pola plataforma de redes eléctricas de España (FUTURED) [31] e titulado *“La Electrónica de Potencia en España: situación y potencial”*, identificou como unha das principais debilidades o déficit de profesionais no campo da electrónica de potencia ante unha demanda crecente.

Debido á transversalidade e amplitude da electrónica de potencia na actualidade, non é doado impartir una formación a nivel de grao universitario que afonde en diferentes temáticas. Na actualidade impártese unha formación básica e xeral que é bastante homoxénea a nivel nacional e europeo. No nivel de mestrado pódense atopar diferencias significativas entre as diferentes titulacións, tanto a nivel nacional como europeo.

Có fin de que os profesionais do futuro poidan adaptarse de xeito doado á evolución tecnolóxica, é moi importante formar aos estudantes de hoxe nas bases das disciplinas e tecnoloxías sobre as que se fundamenta a electrónica de potencia.

7. EPÍLOGO

A electrónica de potencia é unha tecnoloxía que evolucionou de xeito considerable durante o séculos XX e XXI, e esta evolución sempre estivo moi condicionada polos avances acadados noutras tecnoloxías e disciplinas. Solucións de conversión electrónica de potencia que empezaron a ser comercializadas en tempos recentes, baséanse en ideas e conceptos desenvoltois hai máis de medio século, pero que agora son viables grazas á existencia de dispositivos que permiten a súa implementación, ben sexan dispositivos semicondutores de potencia ou dispositivos de procesado que executan algoritmos cada vez máis complexos e elaborados.

A transición inevitable de moitos sistemas eléctricos de potencia cara a sistemas máis sostibles e fiables, trae consigo cambios nas estratexias de operación, que habitualmente veñen acompañadas de maior dixitalización e intelixencia. Neste sentido, as tecnoloxías ligadas á intelixencia artificial ou ao xemelgo dixital, están acaparando gran interese e están empezando a ser integradas en sistemas electrónicos de potencia.

Dende o punto de vista formativo, nestas tecnoloxías que avanza rápido e nas que a súa dimensión medra de xeito exponencial, é moi importante formar aos estudantes con solidez nas disciplinas básicas. Algo que non se debe esquecer, xa que non é posible formar especialistas describindo por riba as novas tecnoloxías sen afondar nos seus fundamentos.

Pecho o meu discurso reiterando o agradecemento aos Académicos da Real Academia Galega de Ciencias por considerar a miña traxectoria merecedora deste recoñecemento.

REFERENCIAS

- [1] Thomas a edison inventor," in Electrical Engineering, vol. 66, no. 2, pp. 113-117, Feb. 1947.
- [2] N. Tesla, "A New System of Alternate Current Motors and Transformers," in Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. V, no. 10, pp. 308-327, July 1888.
- [3] Taalbi, J., Nielsen, H. The role of energy infrastructure in shaping early adoption of electric and gasoline cars. Nat Energy 6, 970–976 (2021).
- [4] "History of the electric vehicle". Wikipedia, the free encyclopedia. Last edited on 25 February 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_electric_vehicle.
- [5] C. F. Scott, "The Induction Motor and the Rotary Converter and their Relation to the Transmission System," in Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. XVIII, pp. 371-382, 1901.
- [6] Greenberg, Bernard S. (1999). "[Rotary Converter Power Technology: AC, DC, and Subway Power](https://www.nycsubway.org/rotary-converter-power-technology-ac-dc-and-subway-power)" nycsubway.org.
- [7] G. W. Vinal, "Electrochemistry and electrical engineering," in Electrical Engineering, vol. 51, no. 4, pp. 238-242, April 1932.
- [8] D. C. Jackson, "The applicability of electrical power to industrial establishments," in Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 29, no. 2, pp. 197-204, Feb. 1910.
- [9] H. W. Leonard, "A New System of Electric Propulsion," in Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. IX, no. 1, pp. 566-577, Jan. 1892.
- [10] A. B. Kulkarni, "Energy consumption analysis for geared elevator modernization: upgrade from DC Ward Leonard system to AC vector controlled drive," 2000 IEEE Industry Applications Conference., pp. 2066-2070 vol.4. Rome, Italy, 2000.
- [11] C. F. Cairns, "The Cabot Converter," in Proceedings of the Institute of Radio Engineers, vol. 7, no. 3, pp. 281-291, June 1919.
- [12] A. H. Ginman, "Radio in Alaska," in Proceedings of the Institute of Radio Engineers, vol. 4, no. 3, pp. 221-231, June 1916.
- [13] T. Johnson, "Naval aircraft radio," in Proceedings of the Institute of Radio Engineers, vol. 8, no. 1, pp. 3-58, Feb. 1920.
- [14] M. P. Hanson, "Aircraft Radio Installations," in Proceedings of the Institute of Radio Engineers, vol. 16, no. 7, pp. 921-965, July 1928.
- [15] M. von Recklingshausen and P. H. Thomas, "Hewitt mercury lamp," Trans. A.I.E.E., vol. 22, pp. 71-90; June 29, 1903.
- [16] O. M. Ward, "Mercury rectifiers vs. rotary converters," in Electrical Engineering, vol. 52, no. 3, pp. 194-196, March 1933.
- [17] O. K. Marti and H. Winograd, "Mercury arc power rectifiers: Their applications and characteristics," in Journal of the A.I.E.E., vol. 46, no. 8, pp. 818-826, Aug. 1927.

- [18] O. M. Ward, "Mercury arc rectifier versus rotary converter automatic railway substations," in *Electrical Engineering*, vol. 51, no. 3, pp. 191-191, March 1932.
- [19] L. R. Ludwig, A. H. Toepfer and F. A. Maxfield, "An Experimental Ignitron Rectifier," in *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 53, no. 1, pp. 75-78, Jan. 1934.
- [20] A. W. Hull, "Gas-Filled Thermionic Tubes," in *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 47, no. 3, pp. 753-763, July 1928.
- [21] J. C. Warner, "Some Characteristics of Thyratrons," in *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, vol. 19, no. 9, pp. 1561-1568, Sept. 1931.
- [22] M. Korytowski, "Uno Lamm: The Father of HVdc Transmission [History]," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 15, no. 5, pp. 92-102, Sept.-Oct. 2017.
- [23] A. U. Lamm, "The peculiarities of high-voltage dc power transmission," in *IEEE Spectrum*, vol. 3, no. 8, pp. 76-84, Aug. 1966.
- [24] C. W. Mueller and J. Hilibrand, "The "Thyristor"—A new high-speed switching transistor," in *IRE Transactions on Electron Devices*, vol. 5, no. 1, pp. 2-5, Jan. 1958.
- [25] H. Sanders, S. Glidden and C. Dunham, "Thyristor based solid state switches for thyatron replacements," 2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), San Diego, CA, USA, 2012.
- [26] Irvin J. David. *The Industrial Electronics Handbook*. CRC Press. (1997).
- [27] I. Yoshida, M. Kubo and S. Ochi, "A high power MOSFET with a vertical drain electrode and a meshed gate structure," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 11, no. 4, pp. 472-477, Aug. 1976.
- [28] B. J. Baliga, M. S. Adler, R. P. Love, P. V. Gray and N. D. Zommer, "The insulated gate transistor: A new three-terminal MOS-controlled bipolar power device," in *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 31, no. 6, pp. 821-828, June 1984.
- [29] B. Jayant Baliga, "Creation of the Insulated Gate Bipolar Transistor," in *75th Anniversary of the Transistor*, IEEE, 2023, pp.299-308.
- [30] A. Q. Huang, "Power Semiconductor Devices for Smart Grid and Renewable Energy Systems," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 11, pp. 2019-2047, Nov. 2017.
- [31] "La Electrónica de Potencia en España: situación y potencial". Plataforma Tecnológica Española de Redes Eléctricas. FUTURED. Diciembre 2019. <https://futured.es/wp-content/uploads/2024/05/Electronica-de-potencia-Futured.pdf>